



JAMPIERRE VIEIRA ROCHA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTAÇÃO
METEOROLÓGICA DE BAIXO CUSTO E
MONITORAMENTO EM TEMPO REAL PARA MANEJO
AUTOMATIZADO DA IRRIGAÇÃO**

LAVRAS – MG

2019

JAMPIERRE VIEIRA ROCHA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE BAIXO CUSTO
E MONITORAMENTO EM TEMPO REAL PARA MANEJO AUTOMATIZADO DA
IRRIGAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Automação e Instrumentação de Sistemas, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. DSc. Ricardo Rodrigues Magalhães

Orientador

Prof. DSc. Luiz Gonsaga de Carvalho

Coorientador

Prof. DSc. Adriano Valentim Diotto

Coorientador

LAVRAS – MG

2019

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Rocha, Jampierre Vieira.

Desenvolvimento de uma estação meteorológica de baixo custo e monitoramento em tempo real para manejo automatizado da irrigação / Jampierre Vieira Rocha. - 2019.

49 p. : il.

Orientador(a): Ricardo Rodrigues Magalhães.

Coorientador(a): Luiz Gonsaga de Carvalho, Adriano Valentim Diotto.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2019.

Bibliografia.

1. Irrigação. 2. Automação. 3. Evapotranspiração. I. Magalhães, Ricardo Rodrigues. II. Carvalho, Luiz Gonsaga de. III. Diotto, Adriano Valentim. IV. Título.

JAMPIERRE VIEIRA ROCHA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE BAIXO CUSTO
E MONITORAMENTO EM TEMPO REAL PARA MANEJO AUTOMATIZADO DA
IRRIGAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Automação e Instrumentação de Sistemas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 21 de Junho de 2019.

Prof. DSc. Ricardo Rodrigues Magalhães	UFLA
Prof. DSc. Luiz Gonsaga de Carvalho	UFLA
Prof. Dsc. Fabio Ponciano de Deus	UFLA
Prof. DSc. Cezar Welter	UFVJM

Prof. DSc. Ricardo Rodrigues Magalhães
Orientador

Prof. DSc. Luiz Gonsaga de Carvalho
Co-Orientador

Prof. DSc. Adriano Valentim Diotto
Co-Orientadora

**LAVRAS – MG
2019**

RESUMO

A irrigação é uma prática que aumenta a produtividade, além de possibilitar a expansão das fronteiras agrícolas. Essa prática deve ser bem conduzida visando o uso eficiente da água pelas plantas, o que requer mão de obra especializada, conseqüentemente eleva os custos de operação. Diante disso, a presente pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de implementar um sistema de irrigação automatizado, partindo da demanda hídrica à operação do sistema. Levando-se em consideração que a demanda hídrica diária é determinada pela evapotranspiração do cultivo, foi desenvolvida uma estação meteorológica de baixo custo, para aquisição diária de dados, os quais permitiram estimar a evapotranspiração de referência (ET_0) pelo modelo *Penman-Monteith-FAO*. Para a determinação da evapotranspiração diária da cultura (ET_c), ensaios preliminares foram estudados, levando-se em consideração o coeficiente de cultura, que multiplicado pela ET_0 forneceu a ET_c com ajuste para irrigação localizada. Assim, diante da quantidade de água requerida pela planta, associado às propriedades físico-hídricas do solo e à hidráulica do sistema de irrigação, foi possível determinar a frequência e o tempo necessário para que o sistema permaneça ligado de forma a atender as necessidades hídricas da cultura sem que a mesma sofra estresse por falta ou excesso de água. Todo o gerenciamento/monitoramento foi implementado de tal modo que o usuário possa acessá-lo de forma remota, por meio de um aplicativo desenvolvido e com acesso a internet. Isso permitiu a transmissão de dados em tempo real, como os dados da estação meteorológica e os *logs* do sistema informando o progresso da irrigação, o que dispensa a presença do usuário ao local de plantio. Além disso, permitiu o supervisionamento de diversas áreas, simultaneamente a um baixo custo

Palavras-chave: Irrigação. Automação. Evapotranspiração

ABSTRACT

Irrigation is a practice that increases productivity and enables the expansion of agricultural frontiers. This practice should be well conducted aiming at the efficient use of water by plants, which requires specialized labor, consequently it increases the operation costs. Based on that, this work is aimed to implement an automated irrigation system, starting from the water demand to the system operation. Taking into account that the daily water demand is determined by the crop evapotranspiration, a low cost meteorological station was developed for daily data acquisition, which allowed to estimate the reference evapotranspiration (ET_0) by the Penman-Monteith-FAO model. To determine the daily evapotranspiration of the crop (ET_c), preliminary tests were performed, taking into account the crop coefficient, which multiplied by ET_0 provided the ET_c with adjustment for localized irrigation. Given the amount of water required by the plant, combined with the physical and hydrological properties of the soil and hydraulics of the irrigation system, it was possible to determine the frequency and time required for the system to remain connected to meet the water needs of the culture without stress due to the lack or excess of water. All management/monitoring has been implemented in way that the user can access it remotely through a developed application with internet access. This allowed real-time data transmission, such as weather station data and system logs informing the progress of irrigation, which eliminates the presence of the user at the planting site. This allows the supervision of many areas simultaneously with low cost.

Keywords: Irrigation. Automation. Evapotranspiration

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Processo evapotranspirativo	13
Figura 3.1 – Diagrama de blocos da EMA proposta	20
Figura 3.2 – Sensor HDC1080	21
Figura 3.3 – Sensor BMP280	21
Figura 3.4 – Abrigo termométrico	22
Figura 3.5 – Sensor BPW34	22
Figura 3.6 – Piranômetro	23
Figura 3.7 – Anemômetro	23
Figura 3.8 – Sensor <i>Reed Switch</i>	23
Figura 3.9 – Placa solar conectada ao arduino	24
Figura 3.10 – Circuito de ligações dos componentes	26
Figura 3.11 – Estrutura da EMA	27
Figura 3.12 – Diagrama de Atividades	29
Figura 3.13 – Tela inicial do aplicativo desenvolvido	31
Figura 3.14 – <i>QR code</i> para <i>download</i> do aplicativo	31
Figura 4.1 – Anemômetro de conchas desenvolvido	32
Figura 4.2 – Dados de temperatura e umidade enviados para o aplicativo móbile	33
Figura 4.3 – Temperatura ECP de Lavras x Temperatura EMA	35
Figura 4.4 – Velocidade do vento registrada pela EMA	35
Figura 4.5 – Pressão ECP de Lavras x Pressão EMA	36
Figura 4.6 – Umidade ECP de Lavras x Umidade EMA	36
Figura 4.7 – Ar saturado com formação de gotículas no abrigo(a) e a temperatura do bulbo úmido(b) e bulbo seco(c) iguais	37
Figura 4.8 – Registros da EMA para o dia 31 de maio de 2019	38
Figura 4.9 – Turno de rega da alfaca para o terreno argiloso(a) e arenoso(b)	38
Figura 4.10 – Turno de rega da rúcula para o terreno argiloso(a) e arenoso(b)	39
Figura 4.11 – Turno de rega da espinafre para o terreno argiloso(a) e arenoso(b)	40
Figura 4.12 – Turno de rega da beterraba para o terreno argiloso(a) e arenoso(b)	40
Figura 4.13 – Lâmina d’água por cultura em função dos dias	41
Figura 4.14 – Tempo de irrigação em horas	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação (E_i)	16
Tabela 2.2 – Coeficiente de cultura (k_c) em diferentes estágios de desenvolvimento . . .	16
Tabela 4.1 – Valores dos itens utilizados na construção da EMA	34
Tabela 4.2 – Valores calculados pelo sistema mediante aos dados de entrada fornecidos pela EMA	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	REFERENCIAL TEÓRICO	9
2.1	O estado da arte em automação na irrigação	11
2.2	Evapotranspiração	13
2.2.1	Equação de Penman-Monteith-FAO	14
2.2.2	Água prontamente disponível	17
3	MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1	Desenvolvimento da estação meteorológica automática	19
3.1.1	Construção dos equipamentos	20
3.1.1.1	Circuito eletrônico	25
3.1.1.2	Instalação dos equipamentos	25
3.1.2	Calibração dos sensores	26
3.1.3	Validação dos dados	27
3.2	Sistema de controle	27
3.2.1	Desenvolvimento do algoritmo para o sistema de controle	28
3.2.1.1	Algoritmo	28
3.2.2	Testes por simulações	29
3.3	Aplicativo	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
5	CONCLUSÕES	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

A expansão da demanda mundial por água, alimentos e energia é um fenômeno que ocorre há séculos, tendo se intensificado nos últimos anos em decorrência do aumento populacional nos países em desenvolvimento, da maior longevidade, da intensa urbanização, do incremento da classe média, principalmente no Sudeste Asiático, além das mudanças no comportamento dos consumidores. Projeta-se, como consequência desses fatores, o crescimento da demanda global por energia em 40% e por água em 50% (WATER, 2017) e a necessidade de expansão da produção de alimentos em 35%, até 2030 (ALEXANDRATOS; BRUINSMA et al., 2012).

A agricultura se modernizou, mas ainda existem desafios. Há grande concentração de riqueza em pequena parcela de propriedades rurais, existem milhões de hectares de solos e pastagens degradados, há grande ineficiência no uso de água na irrigação, e o uso inadequado de agroquímicos oferece riscos à saúde e ao meio ambiente, entre outros problemas (GIBERTONI; PANDOLFI, 2015).

Os recursos hídricos também merecem atenção. O uso no meio rural representa 80,7% do consumo total de água no Brasil, dos quais 67,2% são destinados à irrigação, 11,1% ao consumo animal e 2,4% ao consumo humano (ÁGUAS, 2017). Estima-se que 40% desta água não é aproveitada pelas plantas por conta de vazamentos nas tubulações ou implantação de sistemas inadequados de irrigação para aquela determinada finalidade, gerando grande desperdício de energia e trabalho (GIBERTONI; PANDOLFI, 2015).

O uso eficiente da água nos sistemas de produção agrícola é um dos desafios principais no que diz respeito ao uso racional dos recursos hídricos, como incita a lei 9433/97 (BRASIL, 1997), fato que vem a cada ano tendo importância maior nas discussões de comitês de bacias hidrográficas e nas agências reguladoras do direito do uso da água como a Agência Nacional de Águas (ANA), Ministério do Meio Ambiente (MMA), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Estima-se que a demanda anual por água para a agricultura irrigada no mundo aumentará de $2.6 \times 10^{12} \text{m}^3/\text{ano}$ em 2005-2007 para $2.9 \times 10^{12} \text{m}^3/\text{ano}$ em 2050 e a maior parte desse incremento ocorrerá em países em desenvolvimento (BRUINSMA et al., 2009; FAO et al., 2011).

Desta forma, o uso adequado de recursos hídricos no meio rural envolve decisões sobre a irrigação, uso de métodos recomendados para cada tipo de solo e cultura, além do seu ma-

nejo a partir do monitoramento preciso da evapotranspiração, pela utilização de sistemas mais eficientes e adaptados às condições locais, evitando o desperdício de água e energia.

Nesse sentido, o objetivo principal deste trabalho foi desenvolver e avaliar um equipamento de baixo custo visando o manejo automatizado de um sistema de irrigação localizado. Para este fim, foram estabelecidos, como objetivos específicos, a construção e calibração de um sistema de monitoramento meteorológico automático para fins de determinação de evapotranspiração de referência, o desenvolvimento de um algoritmo para os cálculos de evapotranspiração da cultura, lâmina bruta de irrigação, tempo de irrigação e a construção de uma interface para a integração dos sistemas de monitoramento e controle com o usuário que permita acompanhamento e intervenção.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos sob a coordenação da Organização das Nações Unidas (ONU), visam garantir, até 2030, um planeta mais próspero, equitativo e saudável. Agricultura e alimentação estão no centro dessa agenda mundial (EMBRAPA, 2018).

O Brasil se tornou um dos principais *players*, ou ator, do agronegócio mundial. Hoje, se produz mais em cada hectare de terra, aspecto importantíssimo para a preservação dos recursos naturais, fato que propicia aumento de produtividade sem expansão de fronteiras agrícolas.

Nas últimas cinco décadas, o país passou de importador de alimentos para um dos mais importantes produtores e exportadores mundiais, alimentando aproximadamente 1,5 bilhão de pessoas no mundo (EMBRAPA, 2018).

Observa-se que a tecnologia explica, em grande parte, essa evolução da produtividade. Quando se considera o período entre 1975 e 2015, a tecnologia é responsável por 59% do crescimento do valor bruto da produção, enquanto terra e trabalho explicam 25% e 16% (AGRICULTURA, 2017), respectivamente, do crescimento da produção.

A partir da década de 1990, demandas crescentes e políticas macroeconômicas de estabilização, como controle da inflação e taxas de câmbio mais realistas, impulsionaram ainda mais o crescimento do setor agrícola, que passou a ser o principal responsável pelo superávit da balança comercial brasileira. Entre 1990 e 2017, o saldo da balança agrícola do País aumentou quase dez vezes, alcançando, neste último ano, US\$ 81,7 bilhões (AGROSTAT, 2017).

Em 2016, o agronegócio como um todo representou 23,6% do PIB, (enquanto a produção agrícola por se respondeu por apenas 5% desse montante) e foi responsável por 45,9% do valor das exportações, gerando um saldo comercial de US\$ 71 bilhões (AGRICULTURA, 2017).

A agricultura passou a ser uma atividade geradora de riqueza, atraindo cada vez mais agentes especializados, caracterizada pela presença cada vez maior de estabelecimentos mais modernizados e, com frequência, de média e larga escala de produção (CAMPOS; NAVARRO, 2013). Nesse ambiente de forte competição, a redução dos custos de produção bem como o emprego cada vez maior de novas tecnologias no processo produtivo, com busca por maior eficiência das máquinas agrícolas, dos recursos humanos e dos recursos naturais, tornaram-se requerimento essencial para acessar mercados. De fato, o crescimento da produção ao longo

dos últimos 40 anos foi alcançado principalmente em decorrência de avanços tecnológicos (os quais explicam 59% desse crescimento) (AGRICULTURA, 2017).

Contudo, a agricultura é uma das principais atividades responsáveis pela utilização de 70% da água doce consumida no planeta, devido, entre outros fatores, ao uso ineficiente da água durante o processo de irrigação (BERNARDO, 1997; BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2016; PAZ; TEODORO; MENDONÇA, 2000; JÚNIOR; GERVÁSIO; ARMINDO, 2018)

Em termos globais, o setor agrícola é o principal usuário de terra e água (FAO et al., 2011). A demanda mundial de água deverá aumentar 40% até 2030 e 55% até 2050 – ano no qual se estima que mais de 40% da população mundial viva em áreas de grave estresse hídrico (EDUCATIONAL; ORGANIZATION, 2014).

Várias áreas do mundo já encontram-se em situação de crise hídrica, o que tornou mais que necessário aperfeiçoar os métodos de irrigação com o intuito de melhorar a eficácia desse recurso limitado.

Para que haja racionalidade no uso da água, é necessária a implementação de pesquisas e ações de transferência de informação ao setor produtivo, visando aumentar a eficiência de utilização da água na irrigação (QUAGLIA, 2005; CÉSAR; MELO, 2018)

Embora o Brasil tenha grandes reservas de água doce, incluindo parte majoritária do maior aquífero do mundo (Aquífero Guarani), o País está sujeito à distribuição de água de forma não homogênea, tanto no espaço (Norte – 68,5%; Centro-Oeste – 15,7%; Sul – 6,5%; Sudeste – 6,0% e Nordeste – 3,3%) quanto no tempo, pois algumas regiões têm regime de chuvas concentrado em poucos meses, seguidos de longo período de estiagem e rios intermitentes (PRADO; FORMIGA-JHNSSON; MARQUES, 2017).

A automação é uma realidade em milhões de hectares do cenário rural brasileiro e agrega valor por meio do aumento de produtividade, da diminuição de falhas humanas e da redução do trabalho penoso e de riscos operacionais. Com o uso de sensores e imagens de satélite de alta resolução, entre outras tecnologias na automação, estima-se aumento de produtividade e o desenvolvimento de sistemas de produção mais eficientes (WILDE, 2016).

A agregação de valor por meio da automação, no entanto, ainda está restrita a uma pequena parcela dos produtores brasileiros, sendo que esta parcela detém a maior parte territorial do País. Por outro lado, pequenas propriedades rurais, até o momento, pouco tiveram acesso aos processos de automação (EMBRAPA, 2018).

Com a contínua miniaturização de processadores e elevação da capacidade de processamento com os circuitos integrados 3D, associados ao baixo consumo de energia, a indústria poderá desenvolver equipamentos mais baratos e com maiores aplicações. De fato, de acordo com Developpement (2016), os preços médios de venda de sistemas microeletromecânicos e sensores têm diminuído substancialmente desde o ano 2000, com tendência de queda para os próximos anos. Essa tendência de queda nos custos beneficia a transformação digital na agricultura e deverá ampliar ainda mais o uso dessas tecnologias nos próximos anos para todas as classes de produtores rurais, em especial nos países em desenvolvimento.

No futuro próximo, a agricultura utilizará a inteligência artificial que alimentada por sensores autônomos, permitirão a automação de boa parte do processo de produção. Essa transformação digital pode envolver os seguintes aspectos: sistema de irrigação inteligente, agricultura de precisão com aplicação de inteligência embarcada, automação e rede de sensores locais para mapeamento de solos, monitoramento de doenças e de variáveis meteorológicas (MASSRUHÁ; LEITE, 2016).

A tendência de maior oferta de energia elétrica em localidades remotas e o uso crescente de painéis solares abre uma nova perspectiva para mitigar problemas de comunicação com a ampliação da rede 4G e sua atualização para o novo padrão, a tecnologia 5G vem sendo projetada especificamente para atender, entre outras coisas, a IoT (*Internet of Things*) e sua alta densidade de dados provenientes de milhões de dispositivos conectados ao mesmo tempo. Assim os produtores agrícolas poderão participar da convergência possível pela integração de geotecnologias, agricultura de precisão, da evolução exponencial da inteligência artificial e de outros recursos computacionais para promover a transformação digital das fazendas, viabilizando o chamado *smart farming* e as *smart farms*.

2.1 O estado da arte em automação na irrigação

Grah, Botrel e Matos (2012), em estudos de avaliação de sistemas de irrigação, concluíram que os sistemas automatizados mostraram ser melhores que os métodos convencionais, economizando água e aumentando o rendimento da plantação. Ainda se preocuparam com a falta de energia elétrica e desenvolveram um sistema autônomo de irrigação utilizando a energia hidráulica-mecânica, apresentando uma alternativa de bombeamento para irrigação onde não se tem energia elétrica.

Lino, Neto e Teixeira (2017) utilizaram placas solares para dispensar o uso da energia elétrica convencional, o que atualmente no mundo está se tornando tendência em vários setores, por conta da necessidade de buscar novas fontes de energia renováveis, o que pode ser estendido para projetos futuros voltados para irrigação.

Focados não apenas na eficiência da irrigação, alguns sistemas desenvolvidos se preocuparam em levar comodidade para o usuário, afim de que o mesmo não precise estar no local para saber como está a irrigação. Para isso, o usuário tem todo o gerenciamento/controlado e parecer/resumo do sistema online, podendo acessá-lo de qualquer lugar do planeta (NAGARAJAN; MINU, 2018; MONTOYA et al., 2017; RAJALAKSHMI; MAHALAKSHMI, 2016; QI; LU; DAI, 2017; HAMOUDA; ELHABIL, 2017; IŞIK et al., 2017; GONZÁLEZ-ESQUIVA et al., 2017; MASSERONI et al., 2017; MOHANDAS et al., 2017).

Um sistema para irrigação pode ser classificado em automatizado, onde o sistema toma as decisões de quando e quanto irrigar ou gerenciar, no segundo caso, as informações repassadas para o usuário, sendo que o mesmo toma as decisões do que fazer com esses dados, julgando quando irrigar. Porém, em algumas situações, foram apresentadas ambas as características, dando autonomia para o sistema gerenciar todo o sistema, mas também dando espaço para o usuário interferir nas decisões do sistema (RAJALAKSHMI; MAHALAKSHMI, 2016; QI; LU; DAI, 2017; HAMOUDA; ELHABIL, 2017; SAVIĆ; RADONJIĆ, 2016).

Contudo, as diversas soluções não estão focadas apenas em automatizar a irrigação, é importante que a solução apresentada tenha um preço acessível. César e Melo (2018) propuseram um lisímetro para medir, com precisão, o consumo de água das plantas cultivadas em recipientes e apresentaram uma redução de custo em relação aos sistemas comerciais.

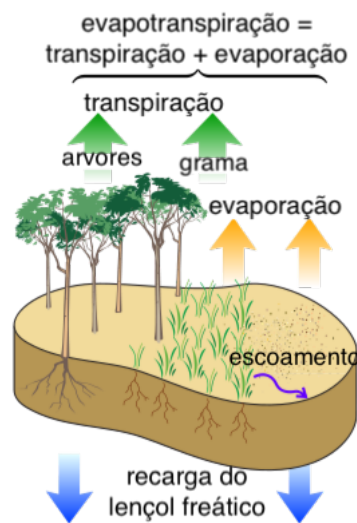
Susmitha et al. (2017) e Sirohi et al. (2016) apresentaram uma melhora no uso do recurso hídrico na irrigação utilizando a previsão do tempo. Olszewski et al. (2017) tiveram como foco principal, utilizar a irrigação automatizada em períodos de geadas para evitar o congelamento das plantas e reduzir a saturação do solo.

Todavia, a automação da irrigação não é algo exclusivo no setor rural. Alguns trabalhos mostraram a necessidade e provaram eficiência na melhoria e economia de água para a irrigação de gramados nas áreas urbanas (BLADO et al., 2017; KOPRDA et al., 2017). Já Asadullah e Ullah (2017) desenvolveram um projeto de baixo custo e eficiente para irrigação das plantas dentro de casa, reduzindo o trabalho humano e economizando energia.

2.2 Evapotranspiração

O termo evapotranspiração (ET_0) é dado pela soma de duas grandezas referente a evaporação da água do solo e da transpiração das plantas. É portanto, o processo de transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera (Figura 2.1). Esse termo é importante para a irrigação para saber a quantidade de água retirada do meio para ser reposta pelo sistema de irrigação.

Figura 2.1 – Processo evapotranspirativo



Fonte: adaptado de Toews (2018)

Entretanto, para efeito de manejo de irrigação, o conhecimento da quantidade de água a aplicar à cultura, passa pela determinação de sua evapotranspiração, sendo conhecida como evapotranspiração da cultura ET_c . Essa é subentendida como sendo a evapotranspiração potencial sem nenhuma restrição agrônômica de cultivo, ou seja, com o solo bem suprido por água e que a planta esteja em sua condição ideal de crescimento e desenvolvimento, sem restrições nutricionais e sem ataque de pragas e doenças.

Para tanto para se conhecer a ET_c , a prática casual é predeterminar a evapotranspiração de referencia (ET_0) multiplicando-a por um fator de correção, chamado coeficiente de cultura (K_c). O K_c varia de acordo com as fases fenológicas da cultura que pode ser entendido como o percentual de água consumida em cada fase fenológica em relação à ET_0 .

Por sua vez, a ET_0 , tida como a evapotranspiração da cultura referência (normalmente grama) cultivada na fase adulta e sem nenhuma restrição agrônômica, pode ser utilizada para diferentes equações. A equação de Penman-Monteith-FAO é a mais utilizada conforme descrito a seguir.

2.2.1 Equação de Penman-Monteith-FAO

Identificar a evapotranspiração da cultura (ET_c) é determinar a quantidade de água a aplicar na irrigação. Entretanto, para estimar a ET_c , inicialmente necessita-se estimar a ET_0 . Existem diversas equações (CARVALHO et al., 2011) para estimativa da ET_0 , sendo que, a equação de *Penman-Monteith-FAO* (2.1) é considerada modelo global padrão para estimativa da evapotranspiração da cultura de referência (ALLEN et al., 1998) e tem seu roteiro definido por Conceição (2006):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2.1)$$

em que,

ET_0 - evapotranspiração de referência, mm/d⁻¹;

R_n - saldo de radiação diário, MJm⁻²d⁻¹;

G - fluxo total diário de calor no solo, MJm⁻²d⁻¹;

T - temperatura média do ar, °C;

u_2 - velocidade do vento a 2 m de altura, m s⁻¹;

e_s - pressão de saturação de vapor d'água, kPa;

e_a - pressão atual de vapor d'água, kPa;

$e_s - e_a$ - deficit da pressão de vapor d'água, kPa;

Δ - declividade da curva de pressão de vapor d'água em relação à temperatura, kPa°C⁻¹;

e

γ - coeficiente psicrométrico, kPa°C⁻¹.

Para estimar a necessidade hídrica para cada cultura, utilizam-se modelos de irrigação, como em Coelho et al. (2012), Marouelli e Freitas (2010) e Medeiros et al. (2013).

A quantidade d'água que o sistema de irrigação fornece é dado em milímetros (mm), obtém-se esse valor por meio do cálculo da lâmina bruta de irrigação, equação (2.2), que representa a quantidade de água a ser aplicada à cultura em cada evento de irrigação, objetivando o suprimento da necessidade hídrica da planta.

$$L_b = \frac{ET_L}{E_i} * 100 \quad (2.2)$$

em que,

L_b - lâmina bruta de irrigação, mm/d⁻¹;

ET_L - evapotranspiração média, para irrigação localizada (2.3), mm/d⁻¹; e

E_i - eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação, %.

Em irrigação localizada não se molha toda a área irrigada, é necessário, ao calcular a ET_c , equação (2.4), considerar um fator de ajuste que leva em conta o percentual da área molhada, ou área sombreada, conforme equação (2.3):

$$ET_L = ET_c * K_L \quad (2.3)$$

em que,

ET_c - evapotranspiração da cultura, mm/d⁻¹; e

K_L - fator de ajuste devido a aplicação localizada da água.

A evapotranspiração da cultura (ET_c) é estimada pela equação (2.4):

$$ET_c = ET_o * K_c \quad (2.4)$$

em que,

K_c - coeficiente de cultivo, adimensional.

E, para a estimativa do K_L utilizou-se a equação proposta por Bernardo (1996):

$$K_L = \frac{P}{100} \quad (2.5)$$

em que,

P - percentual de área sombreada ou molhada, %.

Para estimar da lâmina de irrigação, Equação (2.2), é necessário primeiramente calcular a evapotranspiração da cultura, Equação (2.4), calcular a evapotranspiração média para irrigação localizada, Equação (2.3), aplicar o fator de ajuste, Equação (2.5), e conhecer a eficiência da aplicação de água do sistema de irrigação (E_i). Para isto, sugere-se a utilização de valores tabelados, conforme Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação (Ei)

Métodos	Sistemas	Ei ideal	Ei aceitável
		%	
Superfície	Sulco (convencional)	≥ 70	≥ 60
	Corrugação	≥ 70	≥ 60
	Faixa	≥ 80	≥ 65
	Inundação	≥ 85	≥ 65
Aspersão	Convencional	≥ 85	≥ 75
	Autopropelido	≥ 85	≥ 75
	Pivô central	≥ 85	≥ 75
Localizada	Gotejamento	≥ 95	≥ 80
	Microaspersão	≥ 95	≥ 80
Subsuperficial	Lençol freático estável	≥ 70	≥ 80
	Lençol freático variável	≥ 80	≥ 65

Fonte: Medeiros et al. (2013)

Os valores de ET_c são tabelados para diferentes culturas e fases fenológicas. Esses dados podem ser obtidos por meio de pesquisas específicas, como em Allen et al. (1998). Como exemplo, pode-se utilizar valores de ET_c fornecidos pelo material desenvolvido pela EMBRAPA do estado do Amapá (SEGOVIA; FILHO, 2004), conforme a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Coeficiente de cultura (kc) em diferentes estágios de desenvolvimento

Hortaliça	Estágios de desenvolvimento ¹			
	I	II	III	IV
Abóbora	0,40	0,65	0,90	0,70
Aipo	0,30	0,70	1,00	0,90
Alface	0,40	0,70	0,95	0,90
Batata	0,40	0,70	1,05	0,70
Berinjela	0,30	0,70	0,95	0,80
Beterraba	0,40	0,75	1,05	0,60
Cebola	0,40	0,70	0,95	0,75
Cenoura	0,30	0,70	1,00	0,70
Brássicas	0,40	0,70	0,95	0,80
Espinafre	0,40	0,70	0,95	0,90
Melancia	0,40	0,70	0,95	0,65
Melão	0,40	0,70	0,95	0,65
Milho doce	0,30	0,70	1,05	0,95
Pepino	0,40	0,65	0,90	0,70
Pimenta	0,30	0,60	0,95	0,80
Rabanete	0,30	0,55	0,80	0,75
Repolho	0,40	0,70	0,95	0,80
Tomate	0,40	0,70	1,05	0,60
Vagem	0,30	0,65	0,95	0,85

Fonte: Doorenbos (1975) e Pruitt (1977)

Por fim, para obter o tempo (h) de irrigação que refere-se ao tempo necessário que o sistema de irrigação deverá permanecer funcionando para aplicação da lâmina de irrigação, utiliza-se a equação (2.6) para sistema de irrigação localizada por gotejamento.

$$T_i = \frac{L_b * E_g * E_L}{qe} \quad (2.6)$$

em que,

T_i - tempo de irrigação, h;

E_g - espaçamento entre gotejadores ao longo da linha lateral, m;

E_L - espaçamento entre linhas laterais, m; e

qe - vazão do emissor, L/h.

2.2.2 Água prontamente disponível

Como critério de eficiência da aplicação da água no solo pelo sistema de irrigação, antes do mesmo entrar em funcionamento, é apropriado estabelecer a capacidade de retenção de água pelo solo. Tal informação se faz necessário para evitar que o sistema forneça água que não será aproveitada pela planta, seja por excesso ou deficiência.

Para estabelecer a capacidade de campo e a quantidade de água prontamente disponível para a planta, foram utilizados os critérios descritos por Allen et al. (1998).

A disponibilidade de água no solo refere-se à capacidade de um solo reter a água disponível para as plantas. Após chuvas fortes ou irrigação, o solo drena a água até que a capacidade de campo seja atingida. A capacidade de campo é a quantidade de água que um solo bem drenado deve manter contra forças gravitacionais, ou a quantidade de água restante quando a drenagem diminui acentuadamente. Na ausência de abastecimento de água, o teor de água na zona da raiz diminui como resultado da absorção da água pela cultura. À medida que a absorção da água progride, a água restante é retida nas partículas do solo com maior energia, diminuindo sua energia potencial e dificultando a extração pela planta. Eventualmente, chega-se a um ponto em que a cultura não consegue mais extrair a água restante. A absorção da água torna-se zero (ou insuficiente) quando o ponto de murcha permanente é atingido. O ponto de murcha perma-

¹ Estágios de desenvolvimento.

Estádio I, desde o plantio até 10% do desenvolvimento vegetativo. Estádio II: Desde o final do estágio I até 80% do desenvolvimento vegetativo. Estádio III: Desde o final do estágio II até o início da maturação. Estádio IV: Desde o final do estágio III até a colheita.

nente é o teor de água no solo no qual as plantas não conseguem mais extrair água levando-as à murcha permanente.

Como o teor de água acima da capacidade de campo não pode ser mantido contra as forças da gravidade e como o teor de água abaixo do ponto de murchamento não pode ser extraído pelas raízes das plantas, a água total disponível na zona radicular é a diferença entre o teor de água na capacidade de campo e o ponto de murcha, Equação (2.7):

$$TAW = 1000(\theta_{fc} - \theta_{wp})Z_r \quad (2.7)$$

em que,

TAW - Total de água disponível no solo na zona radicular, mm;

θ_{fc} - Teor de água na capacidade de campo, $m^3 m^{-3}$;

θ_{wp} - Teor de água no ponto de murcha, $m^3 m^{-3}$; e

Z_r - Profundidade efetiva das raízes, m.

TAW é a quantidade de água que uma cultura pode extrair da sua zona radicular e sua magnitude depende do tipo de solo e da profundidade efetiva das raízes. Embora a água esteja teoricamente disponível até o ponto de murchamento, a absorção da água da cultura é reduzida bem antes que o ponto de murcha seja atingido. Onde o solo é suficientemente úmido, o solo fornece água com rapidez suficiente para atender à demanda da cultura e a extração da água é igual a ET_c . À medida que o teor de água no solo diminui, gradativamente a água torna-se mais fortemente retida à matriz do solo, dificultando a extração pela planta. Quando o conteúdo de água no solo reduz abaixo de um valor limiar tolerável pela planta, a água do solo não é mais extraída com a mesma facilidade pelas raízes de forma a atender a demanda de transpiração e a planta começa a sofrer estresse hídrico. Portanto a fração de TAW que uma cultura pode extrair d'água da zona das raízes sem sofrer estresse hídrico é a água do solo prontamente disponível, Equação (2.8):

$$RAW = pTAW \quad (2.8)$$

em que,

RAW - Água do solo prontamente disponível na zona das raízes, mm; e

p - Fator de disponibilidade da água para as plantas. Representa o percentual de água no solo extraível pelas plantas sem que entrem em estresse hídrico.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Ao longo deste trabalho ocorreu o desenvolvimento da Estação Meteorológica Automática (EMA), que foi desenvolvida em três etapas: desenvolvimento, calibração e comparação dos dados.

O desenvolvimento da EMA ocorreu no Laboratório de Agrometeorologia do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Lavras (DEA/UFLA), em parceria com o Laboratório de Ensino de Matemática do Departamento de Exatas da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - Campus Mucuri (LEM/UFVJM). O sistema de controle e o aplicativo foram desenvolvidos no Laboratório de Processamento de Dados I do DAT/UFLA.

O desenvolvimento do sistema de controle para irrigação foi dividido em duas etapas: desenvolvimento e testes de simulação do sistema de irrigação.

O desenvolvimento do aplicativo foi dividido em duas etapas: desenvolvimento e integração dos sistemas.

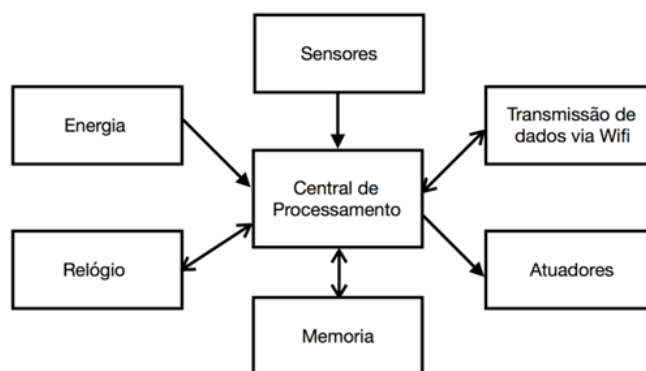
A calibração dos sensores e a comparação dos resultados foram realizados junto a Estação Convencional do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), localizado em Lavras - MG, instalado nas coordenadas de 21° 14' de latitude Sul, 45° 00' de longitude Oeste e 918,841 m de altitude, registrada pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) com o código 83687. Por fim, os testes foram realizados por meio de uma simulação, levando-se em consideração uma área de 250 metros quadrados (25mx10m) do Setor de Engenharia de Água e Solo do DRS/UFLA. Tal método de simulação se deu por viabilidade financeira, evitando a construção de todo o sistema de irrigação.

3.1 Desenvolvimento da estação meteorológica automática

Para a idealização do projeto, foi elaborado um diagrama de blocos da EMA, conforme Figura 3.1. O bloco principal, intitulado “Central de Processamento”, gerencia todas as funções do equipamento, incluindo as entradas e saídas do sistema. Os blocos indicados por seta em sentido a Central de Processamento representam os dados de entrada, neste caso, “Energia” e “Sensores”. O bloco “Energia” promove a auto-suficiência energética do sistema por meio da bateria que é carregada por um painel solar. O bloco “Sensores” é responsável pelo envio dos sinais elétricos que representam os fenômenos meteorológicos. Os blocos indicados por setas nos dois sentidos, são blocos de entrada e saída, neste caso, “Relógio”, “Memória” e “Trans-

missão de dados via *Wifi*". O "Relógio" é responsável por informar à Central de Processamento, o momento exato de executar as operações. A "Memória" armazena os dados coletados pelos Sensores e processados pela Central de Processamento. A "Transmissão de dados via *Wifi*" envia os dados coletados pelos Sensores que são processados pela Central de Processamento para um servidor online, que recebe as operações desejadas pelo usuário para serem tratadas pela Central de Processamento. O bloco de saída "Atuadores" é indicado pela seta que está em sentido contrário à Central de Processamentos e é responsável pelo acionamento¹ dos setores do sistema de irrigação.

Figura 3.1 – Diagrama de blocos da EMA proposta



Fonte: Do autor (2019)

A EMA foi dividida em três partes, as quais desempenham o papel de realizar a leitura e o registro dos dados das variáveis meteorológicas automaticamente, tendo os registros dos dados armazenados na memória externa do equipamento e salvos na *cloud* (nuvem), disponibilizando o acesso do último ano, com disposição dos dados mensais, diários, horários ou em tempo real pelo aplicativo (Seção 3.3).

3.1.1 Construção dos equipamentos

Para a construção dos equipamentos mecânicos e proteção dos sensores, foi utilizada uma Impressora 3D da marca GTMAX3D, modelo Core H4, cujo acesso foi propiciado pela UFVJM.

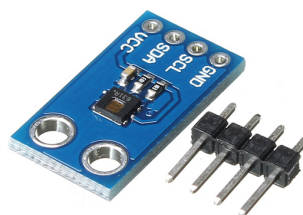
A Central de Processamento, que é o "cérebro" do projeto, contou com um microcontrolador ESP-8266EX de 80MHz (Velocidade de *clock* ou velocidade de processamento) e memória de 4 Mb. Todos os blocos (Figura 3.1) foram conectados à Central de Processamento,

¹ Como os testes foram por simulação, o bloco atuadores foi programado no sistema porém a parte física não foi implementada por questões de limitação financeira

que por sua vez, foi responsável por gerenciar os dados recebidos pelos blocos e processá-los. A escolha deste microcontrolador de prototipagem se deu para atender as exigências conferidas pelos periféricos e complexidade do algoritmo (Subseção 3.2.1.1).

Para mensurar os fenômenos meteorológicos foram utilizados sensores, os quais enviam os dados de temperatura, umidade, pressão, saldo de radiação de ondas curtas e velocidade do vento para a Central de Processamento por meio de sinais elétricos. Os dados registrados pela EMA é dedicada para estimar a evapotranspiração de referência por meio da Equação (2.1) de *Penman-Monteith-FAO* (ALLEN et al., 1998). Portanto, os sensores mensuram as variáveis: Temperatura do ar, Radiação solar, Velocidade do vento, Umidade e Pressão. Para a leitura de temperatura e umidade foi utilizado o sensor HDC1080 (Figura 3.2), que opera em tensão de 2.7 V DC à 5.5 V DC e faixa de operação de -40 à 125°C. Este sensor tem precisão de umidade $\pm 2\%$, precisão de temperatura de $\pm 0.2^\circ\text{C}$ e consumo de 100nA em modo *sleep*.

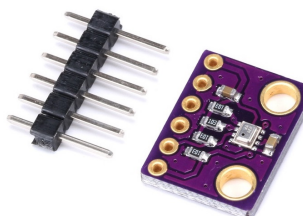
Figura 3.2 – Sensor HDC1080



Fonte: Bidorbuy (2018)

Para medir a pressão, foi utilizado o sensor BMP280 (Figura 3.3), que opera na faixa de 300 à 1100hPa (equivalente a 9000 e -500m acima/abaixo do nível do mar), com precisão de $\pm 0.12\text{hPa}$ ou ± 1 metro.

Figura 3.3 – Sensor BMP280

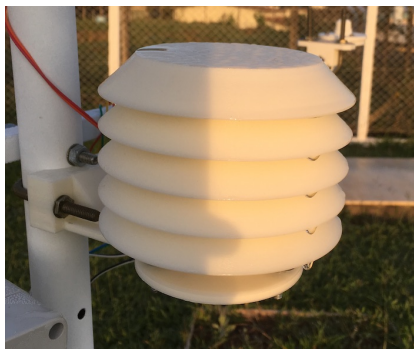


Fonte: Grahl (2017)

A ação de intempéries sobre os sensores de temperatura, umidade relativa do ar e pressão pode ocasionar leituras imprecisas. Para que não haja formação de condição micrometeorológica próximo aos sensores diferente do real, foi confeccionado um abrigo termométrico em ABS (*Acrilonitrila butadieno estireno*), na cor branca, para refletir a maior quantidade possí-

vel de energia solar, Figura 3.4. Isso permitiu que condição micrometeorológica próximo aos sensores seja o mais próximo possível da condição atmosférico.

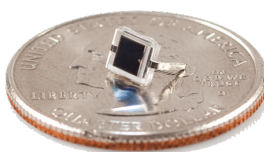
Figura 3.4 – Abrigo termométrico



Fonte: Do autor (2019)

Para a medida da radiação solar foi construído um piranômetro baseado em um fotodiodo. O fotodiodo é um elemento eletrônico, que tem seu comportamento diretamente relacionado à intensidade da radiação luminosa incidente. Utilizou-se o sensor BPW34 (Figura 3.5). Essa mini célula solar é sensível a uma ampla gama de comprimentos de onda de luz (430-1100nm), produzindo energia em varias configurações diferentes. O sinal elétrico passa por um condicionador de sinal que converte corrente em sinais para tensão e, posteriormente, envia para a Central de Processamento.

Figura 3.5 – Sensor BPW34



Fonte: RodriSZ (2014)

Para abrigar e proteger o sensor das intempéries, foi construído uma estrutura via impressão 3D, que compõe o piranômetro em ABS, Figura 3.6.

O anemômetro de concha é um sensor que mede a velocidade do vento somente no plano horizontal. Neste caso, um cilindro foi projetado com um furo no centro, que é a base do anemômetro (Figura 3.7). Por dentro do cilindro, passa-se um eixo que sustenta as conchas. Foram confeccionadas três conchas em um suporte, sendo igualmente espaçadas entre si em ângulo de 120°, com o eixo fixo em um rolamento, objetivando propiciar maior sensibilidade ao sensor.

Figura 3.6 – Piranômetro



Fonte: Do autor (2019)

Figura 3.7 – Anemômetro



Fonte: Do autor (2019)

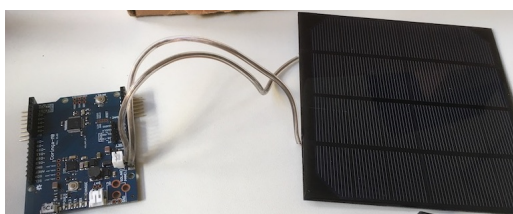
A parede da base do cilindro é mais espessa para fixar o sensor magnético (*reed switch*, Figura 3.8). Ao fixar um ímã no eixo do anemômetro, de forma que, ao girar o eixo, o ímã ficasse próximo ao *reed switch*, foi possível fazer com que o circuito de polarização tipo *pull-up* transformasse o sinal *HIGH* para *LOW*. Cada revolução das conchas do anemômetro gerou um pulso elétrico para o contador na Central de Processamento. Usando este procedimento, quando, conectado à Central de Processamento, foi possível computar o número de pulsos ao girar o eixo do anemômetro. O total de pulsos emitidos em determinado intervalo de tempo é proporcional à velocidade média do vento naquele período.

Figura 3.8 – Sensor *Reed Switch*

Fonte: Commons (2015)

A EMA é um dispositivo eletrônico e requer energia elétrica para seu funcionamento. A energia elétrica utilizada é oriundo de um painel solar de 5W (Figura 3.9). A partir da captação dos raios solares, as partículas da luz solar (fótons) colidem com os átomos do material que é composto o painel solar, provocam o deslocamento dos elétrons, gerando uma corrente elétrica, que por sua vez, carrega a bateria. A bateria acumula energia elétrica e a libera aos poucos durante o período em que o painel solar não estiver exposto à radiação solar. Desta forma, foi possível fazer com que o circuito estivesse em funcionamento o tempo todo (dia e noite).

Figura 3.9 – Placa solar conectada ao arduino



Fonte: Do autor (2019)

A Central de Processamento contou com um módulo de memória externa para manter os registros do sistema em um cartão microSD do tipo EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*). Estes registros foram gerados a partir da coleta de dados e gravados no cartão microSD, um *datalogger*. O sistema operou seguindo o horário UTC (*Coordinated Universal Time*), onde a cada hora salva um *log* com informações na seguinte ordem: horário atual; temperatura de instante, máxima e mínima, o mesmo se repete para umidade e pressão; velocidade do vento; radiação solar; temperatura interna do sistema. Os arquivos de *logs* foram criados diariamente pelo sistema na extensão de arquivo de texto (.txt). O nome do arquivo foi gerado com a inicial "a" seguindo da data atual disposta em ano, mês e dia, garantindo que diariamente fosse criado um arquivo único contendo um cabeçalho e 24 registros referente as coletas do dia.

Todas as informações enviadas para a Central de Processamento pelos sensores foram acessadas remotamente por um aplicativo (Seção 3.3) e por um servidor Web. Esse processo foi viabilizado pelo fato de que a Central de Processamento possui um módulo integrado *Wifi* ESP-12. Este módulo tem acesso a internet para que todos os dados coletados e processados sejam transmitidos ao usuário. O ESP-12 opera no padrão *wireless* 802.11 b/g/n com segurança WEP, WPA, TKIP e AES, transmitindo os dados pelo protocolo TCP/IP e comunica com a Central de Processamento via interface serial.

Para registro e controle do tempo, foi utilizado um relógio, o módulo *Real Time Clock* (RTC) DS3231 para fornecer informações como segundos, minutos, dia, data, mês e anos. O mesmo conta com correções como meses com menos de 31 dias e anos bissextos, além de operar com tensão de 3,3 V à 5 V. Em caso de falha de energia, o DS3231 automaticamente aciona a bateria que acompanha o módulo para evitar a perda de dados e continua atualizando as "horas", consumindo menos de 500 nA no modo bateria com oscilador em funcionamento. A comunicação de dados ocorre via protocolo *Inter-Integrated Circuit* (I2C) para a Central de Processamento, as quais são necessárias para precisar a contagem de tempo em que o sistema de irrigação deve manter-se acionado.

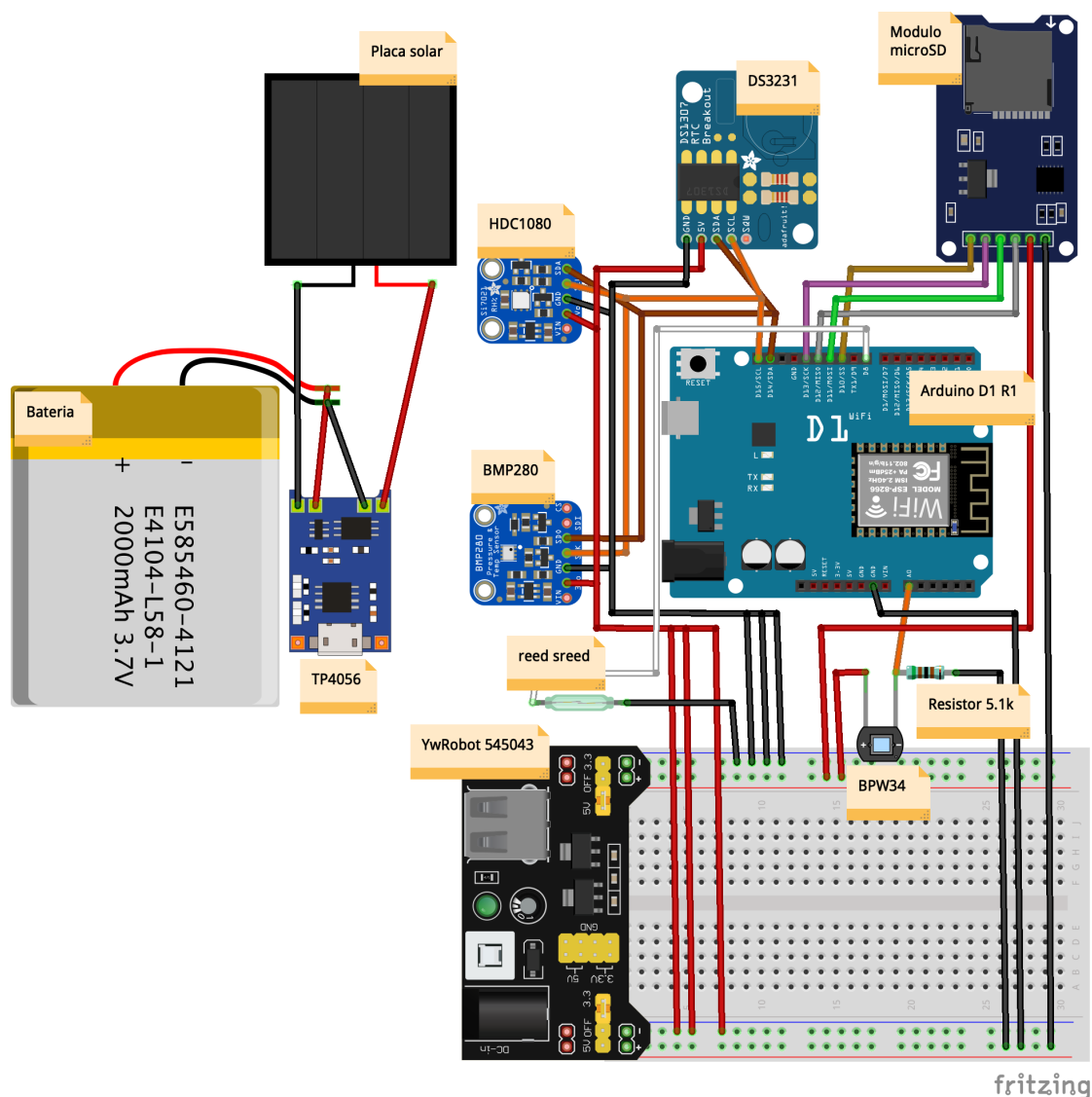
3.1.1.1 Circuito eletrônico

O esquema do circuito eletrônico pode ser visualizado com o auxílio da Figura 3.10. Como um módulo de alimentação (para não sobrecarregar a placa arduino em demanda energética, foi utilizada uma fonte ajustável YwRobot para fornecer 3.3v ou 5v para os módulos, deixando a placa arduino responsável apenas para leituras dos sinais através das portas de entrada. Os sensores HDC1080, BMP290 e o módulo RTC são alimentados por 3.3v, tendo as suas portas SCL (*Serial Clock*) e SDA (*Data*) conectadas a porta SCL e SDA da placa arduino, respectivamente. Já o BPW34 é alimentado por 5v e na outra saída conectado ao A0 e com um resistor de 5.1k, conectado ao terra. O *reed switch* com uma saída conectada ao terra e a outra ao D8. O módulo do cartão micro SD foi alimentado por 5v, MISO conectado ao D12, MOSI ao D11, SCK ao D12 e CS ao D10. Por fim, o terra do YwRobot foi conectado ao terra do arduino para equalizar o "terra" de ambos os equipamentos.

3.1.1.2 Instalação dos equipamentos

Para o posicionamento dos equipamentos, foi adaptado um tripé articulado, Figura 3.11. O mesmo foi elevado e confeccionado um furo na parte inferior para suspender a barra principal e atingir a altura de 2m, onde foi instalado o anemômetro. O piranômetro e o abrigo termométrico foram instalados a 1,5m do solo. Além da altura correta dos equipamentos, os sensores foram instalados de forma que não houvesse interferência nas leituras das variáveis meteorológicas por meio de objetos que pudessem obstruir a leitura dos sensores. O tripé foi pintado de branco para minimizar as interferências térmicas nas leituras dos sensores. Como os equipamentos ficaram em campo exposto à irradiação solar, vento e chuva, foi utilizada para

Figura 3.10 – Circuito de ligações dos componentes



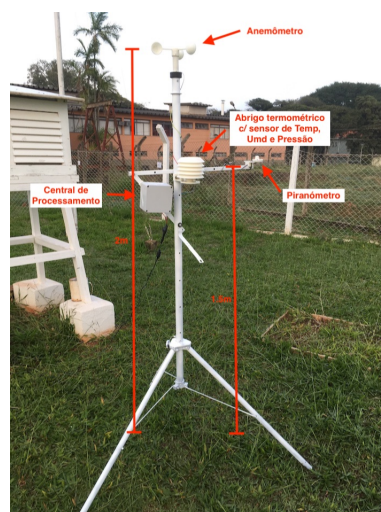
Fonte: Do autor (2019)

pintura resistente às condições externas. A caixa onde foi abrigada a Central de Processamento é de acrílico resistente às intempéries.

3.1.2 Calibração dos sensores

Os sinais numéricos oriundos dos sensores é dada pela conversão dos sinais elétricos em métricas pertinentes para a equação (2.1) e para o usuário. O sensor de Temperatura e Umidade do ar fornece dados em graus ($^{\circ}\text{C}$) e percentual de umidade (%), respectivamente. A velocidade do vento foi medida em metros por segundo (m/s), a pressão em kilopascal (kPa), e a radiação solar de ondas curtas em megajoule por metro quadrado dia ($\text{MJ}/\text{m}^2\text{d}^{-1}$). Além da conversão, foi verificado, de forma empírica, se os valores gerados pelo sistema estavam coerentes.

Figura 3.11 – Estrutura da EMA



Fonte: próprio autor

3.1.3 Validação dos dados

Diferentemente da calibração dos sensores, a validação dos dados se deu pela verificação se os sinais processados pela central e convertidos estavam equivalentes aos dados coletados por uma segunda EMA, que por sua vez já havia sido calibrada e validada. No caso deste trabalho, utilizou-se como base para validação, a estação meteorológica automática do INMET, localizada em Lavras, nas coordenadas de 21° 14' de latitude Sul, 45° 00' de longitude Oeste e 918,841 m de altitude.

3.2 Sistema de controle

O Sistema de Controle contém o algoritmo desenvolvido e armazenado na memória da Central de Processamento. Suas instruções tratam todas as informações recebidas pelos sensores e as armazena na memória externa. Ao final de um período pré determinado de tempo, esses dados foram tratados como médias em função do tempo, “alimentando” a equação (2.1), que por sua vez, realiza as devidas formulações algébricas para chegar a lâmina de irrigação, obtendo-se a quantidade de água necessária a ser aplicada a cultura em cada evento de irrigação. Conhecendo-se a lâmina de irrigação e qual o sistema de irrigação implantado, foi possível, conhecendo a vazão do sistema hidráulico, calcular o tempo necessário em que o sistema deve permanecer ligado, objetivando o suprimento das necessidades hídricas da planta. Com isso, a Central de Processamento, acessa o Relógio, para controlar com precisão o tempo em que os atuadores permanecem funcionando. Os relés ligam as válvulas solenoide para acionar os

setores do sistema de irrigação e todos os dados recebidos e informações processadas são transmitidos para um servidor web, para uso/informativo do usuário.

3.2.1 Desenvolvimento do algoritmo para o sistema de controle

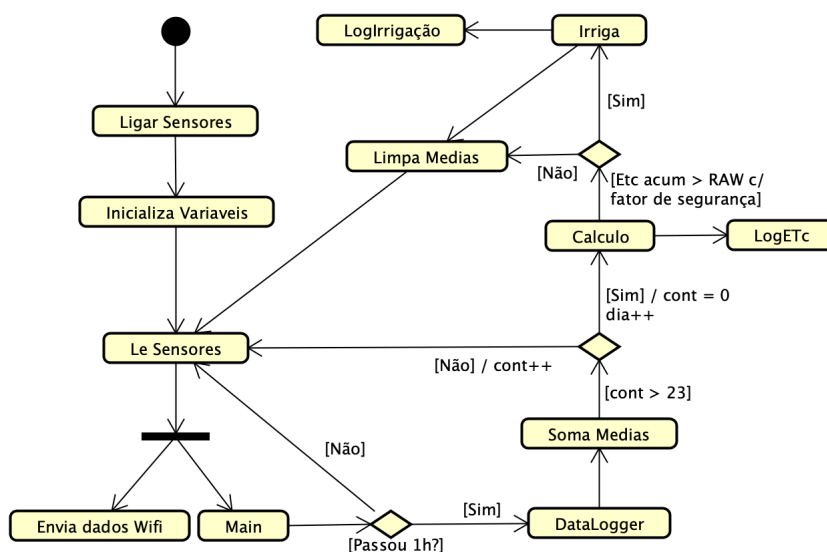
O desenvolvimento do sistema foi realizado, cumprindo-se todas as etapas do processo de desenvolvimento de software: levantamento e análise de requisito, documentação, metodologia de desenvolvimento Ágil e testes.

3.2.1.1 Algoritmo

O algoritmo² foi desenvolvido a partir do fluxograma apresentado na Figura 3.12. O programa inicia ativando os sensores, seguindo os padrões estabelecidos por suas respectivas bibliotecas inclusas. Ao ligar os sensores, uma função é executada para inicializar as variáveis globais necessárias para o correto funcionamento do programa como um todo. Em seguida, uma função é configurada para enviar, a cada 2 segundos, os dados coletados pelo sistema para o servidor. Todas essas instruções são executadas no *setup* do arduino. Ao final desta etapa, as instruções do *loop* é inicializada. O primeiro passo foi realizar as leituras dos sensores de forma iterativa, atualizando as variáveis globais, ao passo que, a cada uma hora de processamento foi gerado um *log* contendo os registros do sistema com informações da última hora de execução. Após a gravação do *log* são calculadas as médias referentes ao dia atual até o momento de execução. Ao completar o período de 24h, é realizada a estimativa da ET_c (junto com o fator de ajuste, K_L , para irrigação localizada para obter a evapotranspiração média) e o cálculo da capacidade de campo, e gravado em um arquivo os resultados das equações 2.1 e 2.7. Ao final, realiza-se o cálculo do *RAW* (*Readily available water*) ou Água prontamente disponível, para estimar se a planta encontra-se ou está próxima do estresse hídrico. Caso positivo, o sistema converte a lâmina d'água necessária no tempo que o sistema deve permanecer ligado para suprir a necessidade hídrica da planta sem fornecer água a mais que o solo possa comportar. Para garantir tal comportamento, o cálculo da ET_c é acumulado até que ultrapasse o *RAW* remanescente. Desta forma, o turno de irrigação não é fixo, podendo variar de acordo com a água prontamente disponível para a planta ao longo dos dias, dependendo da evapotranspiração da cultura.

² Disponível no link: <<https://github.com/Jampierre/Mestrado>>

Figura 3.12 – Diagrama de Atividades



Fonte: Do autor (2019)

3.2.2 Testes por simulações

Os testes simularam a irrigação em uma área de 250 metros quadrados (25mx10m) do Setor de Engenharia de Água e Solo do DRS/UFLA. Foi simulado um sistema de irrigação por gotejamento. Para validar os resultados por meio da simulação o RAW foi acumulado até atingir o fato de segurança, condição necessária para acionar o sistema de irrigação, que foi avaliado pelo resultado da equação (2.6) que retorna seu valor em medida de tempo(horas), para verificar se este tempo, que corresponde ao tempo em que o sistema de irrigação permanecera ligado, é o ideal para suprir a necessidade hídrica da planta. Esta necessidade hídrica é obtida pela transferência d'água do sistema solo-água-planta-atmosfera e que deve ser reposta pelos gotejadores, ou seja, o sistema de irrigação por gotejamento, que tem sua vazão em L/h. Este equipamento deve gotejar por tempo suficiente para fornecer a quantidade necessária de água sem exceder a capacidade de campo. A simulação se deu, por conta de que os gotejadores não foram implantados, então, a vazão em L/h foi considerada a especificada pelo fabricante e tomada como real, regular e constante em todo o sistema de irrigação, desconsiderando as possíveis falhas e problemas que podem ocorrer em um sistema de irrigação por gotejamento, como: entupimento da saída do gotejo, variação da pressão d'água ao longo do sistema, discrepância da vazão em L/h, etc.

Para as simulações, seguiram-se os respectivos critérios: solo argiloso com teor de água no solo na capacidade de campo (θ_{fc}) de 0.40; teor de água no solo no ponto de murcha (θ_{wp}) de 0.24; eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação localizada por gotejamento de

95%; 0.2m de espaçamento entre gotejadores ao longo da linha lateral (E_g); 0.2m espaçamento entre linhas laterais (E_L); 50% da área que deve ser molhada (P); vazão dos gotejadores de 1.5 L/h; coeficiente da cultura (K_c) da Alface na fase inicial, desenvolvimento, produção e maturação de 0.5, 0.7, 0.95 e 0.9, respectivamente; K_c da Rúcula de 0.4, 0.7, 0.95 e 0.75; K_c da Espinafre 0.4, 0.7, 0.95 e 0.9; K_c da Beterraba de 0.4, 0.75, 1.05 e 0.6; profundidade de enraizamento (Z_r) da Alface de 0.1, 0.2, 0.25 e 0.35; Z_r da Rúcula de 0.1, 0.2, 0.25 e 0.35; Z_r da Espinafre de 0.1, 0.2, 0.3 e 0.4; Z_r da Beterraba de 0.2, 0.35, 0.5 e 0.7; fração de TAW que pode ser esgotada antes de entrar no estresse de umidade (p) da Alface, Rúcula, Espinafre e Beterraba de 0.3, 0.3, 0.2 e 0.5, respectivamente. Por fim, foi aplicado um fator de segurança de 20% do RAW para que o mesmo não atinja valores iguais a zero e para que a planta não entre no estado de estresse. Uma nova simulação seguiu os mesmo critérios, alterando apenas o tipo de solo, que passou a ser arenoso com θ_{fc} de 0.17 e θ_{wp} de 0.07. Todos os testes foram considerados em um período de irrigação de 45 dias, dividindo a fase inicial entre o dia 0-4, desenvolvimento entre 5-14, produção entre 15-35 e maturação entre 36-45. É conhecido que cada fase das culturas e o prazo de 45 dias possuem variações, sendo que os mesmos foram tomados como referência apenas para fins de simulação. Assim, como os dados utilizados nos testes, como o sistema de irrigação, não foi implantado, não houve a necessidade de esperar os 45 dias para coleta de dados e obter os resultados. Neste caso, foi populado o sistema com os dados da EMA de Viçosa, registros que foram coletados entre os dias 01/02/2019 e 15/03/2019. Todos os dados da simulação estão disponíveis no link³.

3.3 Aplicativo

Através da ferramenta *Blynk*, foi desenvolvido um aplicativo móvel (Figura 3.13), para plataforma iOS e Android, que tem acesso em tempo real aos dados da EMA através da Central de Processamento. Por meio do aplicativo, o usuário pode interagir com o sistema, solicitando informações dos sensores, seja do exato momento, diário, semanal ou mensal, além de saber quando o sistema de irrigação foi ativado e seu consumo de água.

O aplicativo encontra-se disponível para download através do *app Blynk*, escaneando o *QR code* (Figura 3.14).

Todo o sistema construído para a EMA se comunica com o servidor pelo link: *blynk-cloud.com*. Sua comunicação é feita pelo protocolo TCP/IP por padrão porta 80. Isso garante

³ <<https://github.com/Jampierre/Mestrado>>

Figura 3.13 – Tela inicial do aplicativo desenvolvido



Fonte: Do autor (2019)

Figura 3.14 – QR code para download do aplicativo



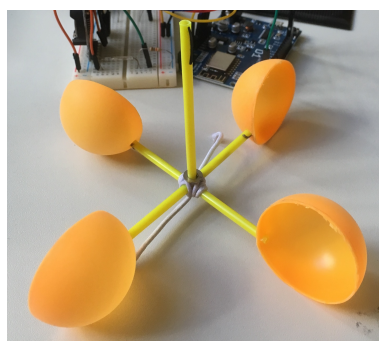
Fonte: Do autor (2019)

que todo os dados processados pela central sejam enviados e mantidos pelo servidor, podendo ser acessado pelo aplicativo mobile.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente foi planejando a construção de alguns equipamentos mecânicos com materiais reciclados, como por exemplo, a construção do anemômetro de conchas utilizando hastes plásticas e bolinhas de *ping pong* (Figura 4.1), porém, o resultado final apresentou-se inapropriado, estando o mesmo desalinhando e desbalanceado. Para a construção do anemômetro, utilizou-se uma Impressora 3D da marca GTMAX3D modelo Core H4, projeto modelado por Szostak (2017). Como a confecção do anemômetro de conchas pela impressora 3D mostrou-se satisfatória por conta da resistência do material, nível de precisão da replica e facilidade de manuseio, optou-se a mesma estratégia para a construção do abrigo termométrico e o suporte para o piranômetro. Tais projetos foram modelados por Ham (2015) e Ham (2013).

Figura 4.1 – Anemômetro de conchas desenvolvido



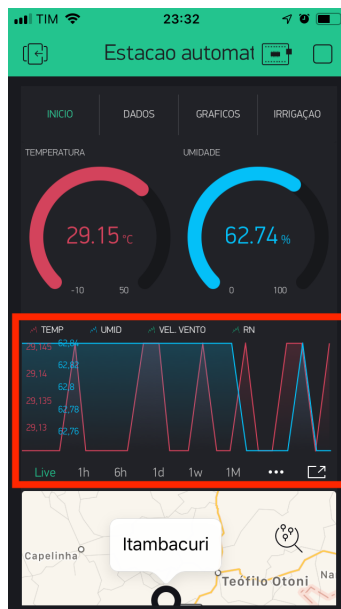
Fonte: próprio autor

A bateria de 3.7V não se mostrou suficiente para alimentar todo o sistema, devido ao número de equipamentos alimentados simultaneamente. Quando o sistema foi mantido pela bateria, o módulo do cartão microSD mostrou-se inoperante, não gerando o *datalogger* necessário. Com isso, a proposta da utilização da placa solar como meio de gerar autossuficiência energética para o sistema manteve-se para os módulos e sensores, excluindo o cartão microSD. Para prosseguir com o projeto foi utilizada uma fonte externa de entrada de 127V e saída de 9V.

Na arquitetura inicial, a bateria "alimentava" o arduino, que por sua vez, "alimentava" os sensores e módulos. Desta maneira, foi observado uma sobrecarga na placa arduino, fazendo com que alguns módulos ficassem inoperantes e por alguns instantes, os sensores realizavam leituras incorretas por conta da insuficiência energética. Como solução, foi necessário incluir a fonte externa para alimentar os sensores e módulos, deixando o arduino exclusivamente para leitura dos valores de entrada. Com tal método, o sistema manteve sua funcionalidade.

No processo de coleta de dados, observou-se que alguns dados coletados mostraram-se inconsistentes pelo fato de gerarem picos ou falhas na leitura, como observado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Dados de temperatura e umidade enviados para o aplicativo móvel



Fonte: próprio autor

Como informado pelo fabricante, de que há um *delay* no recebimento dos sinais, foi necessário aumentar o tempo de intervalo para leitura dos sensores, pois cada sensor necessita de um intervalo entre uma leitura e outra para garantir a confiabilidade dos sinais coletados.

Após a implementação de todos os trâmites envolvendo a eficiência da coleta dos dados, o sistema mostrou-se tecnicamente viável, apresentando valores de leitura de cada sensor similares ao real.

O algoritmo referente ao *datalogger* gerou diariamente arquivos contendo os registros climatológicos sem perda de dados. Manteve o padrão do nome da criação do arquivo, cabeçalho e o número de registro coletados, como esperado ao dia. A organização dos arquivos foram realizadas por meio de uma estrutura de pastas criadas ao longo do tempo pelo próprio sistema, em que o mesmo organiza a raiz com pastas referentes ao mês. Dentro do respectivo mês, foram criados os arquivos diários. Sendo assim, foi possível o *datalogger* manter os registros por um ano.

Os equipamentos foram instalados respeitando as alturas padronizadas, 1,5 m para os sensores internos ao abrigo termométrico e o piranômetro, e 2 m para o anemômetro, conforme Figura 3.11.

O custo total da EMA foi de R\$632,22 como pode ser visto na Tabela 4.1. Seu valor encontra-se abaixo do preço de mercado (a partir de R\$999,00) como por exemplo a Estação Meteorológica Nexus com preço inicial de R\$2.464,99.

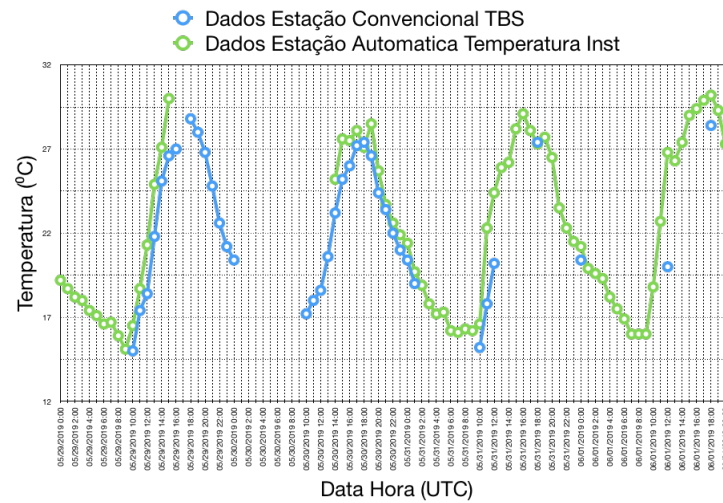
Tabela 4.1 – Valores dos itens utilizados na construção da EMA

Item	Descrição	Qtd	Valor und	Total
1	Arduino WeMos D1 R1	1	R\$49,90	R\$49,90
2	Fonte ajustável YwRobot 545043	1	R\$10,90	R\$10,90
3	Módulo Carregador de Bateria de Lítio PT4056	1	R\$6,90	R\$6,90
4	Sensor de Pressão e Temperatura BMP280	1	R\$24,90	R\$24,90
5	<i>Real Time Clock</i> RTC DS3231	1	R\$32,28	R\$32,28
6	Caixa Plástica ABS 158 x 90 x 60mm	1	R\$27,48	R\$27,48
7	Módulo Cartão SD	1	R\$11,88	R\$11,88
8	Cartão de Memória 2GB	1	R\$19,00	R\$19,00
9	Resistores	3	R\$2,40	R\$7,20
10	<i>Kit Jumpers</i> - 10cm x120 Unidades	1	R\$17,88	R\$17,88
11	Sensor de Umidade e Temperatura HDC1080	1	R\$64,90	R\$64,90
12	Mini célula solar fotovoltaica BPW34	1	R\$5,61	R\$5,61
13	<i>Reed Switch</i> Chave Magnética	1	R\$4,68	R\$4,68
14	Bateria 7.4V 1.5A Unipower	1	R\$38,01	R\$38,01
15	Painel Placa Célula Energia Solar Fotovoltaica 12v 5w Watts	1	R\$168,00	R\$168,00
16	Tripé Articulado	1	R\$125,00	R\$125,00
18	Filamento ABS Premium Branco (200g)	1	R\$17,00	R\$17,00
			Valor Final	R\$632,22

Para validar a EMA, a mesma foi instalada dentro da estação climatológica principal (ECP) de Lavras. Inicialmente, os dados foram registrados de hora em hora para fins comparativos, porém, com o acesso frequente às instalações dos equipamentos, foi constatado, por parte da equipe responsável por manter a ECP, erros/incoerência na leitura de alguns sensores, por isso os valores coletados apresentam uma série de dados faltantes (Figura 4.3).

Notou-se ainda que os registros das temperaturas mínimas do dia ocorreram entre 9 e 10 da manhã, enquanto os picos forem por volta das 17 e 18h, conforme Figura 4.3. Os dados de referencia apresentaram coerência, por registrarem valores seguindo o mesmo padrão. Durante o período de insolação, período em que há um aumento na temperatura, os dados coletados pela estação automática apresentam média dos valores superior de 2.7°C, com comportamento atípico dos picos. Isso pode ser justificado pelos registros da velocidade do vento (Figura 4.4), em que, nesses horários, foram registradas as maiores medidas, deixando o resto do dia com valores próximos ou iguais a zero. Os registros superiores nos horários de insolação pode ter ocorrido por um efeito estufa no interior do abrigo, pelo fato de ter sido confeccionado em ABS e ter um diâmetro menor, quando comparado a casa de cerração, o que causa uma proporção de diâmetro-volume superior. Tal observação se confirma pelo fato de que, nos horários onde não

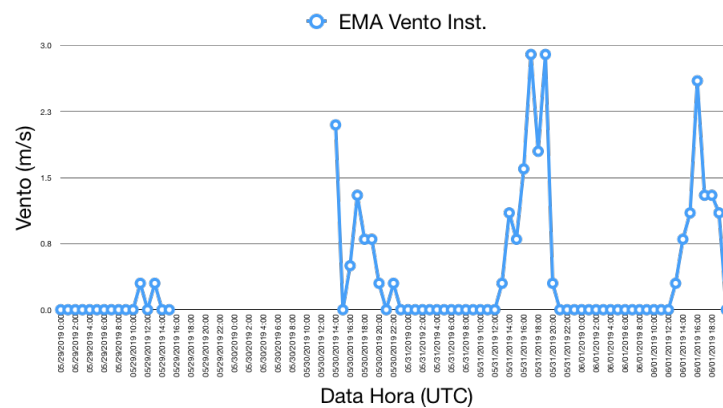
Figura 4.3 – Temperatura ECP de Lavras x Temperatura EMA



Fonte: próprio autor

há irradiação solar, os valores registrados foram próximos aos da estação calibrada, tendo uma diferença média em torno de 0.7°C . Para fins de comprovação, seria necessário acompanhar os registros dos dados no período das 10 às 18h com chuva ou um dia sem incidência de raios solares, o que não foi possível durante a coleta de dados neste trabalho.

Figura 4.4 – Velocidade do vento registrada pela EMA

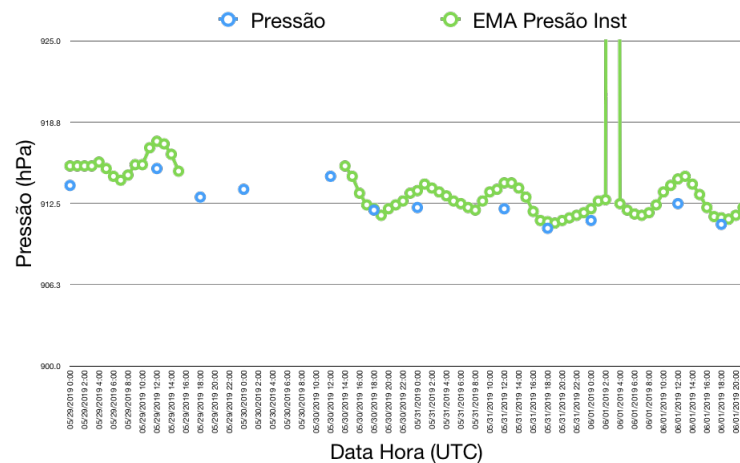


Fonte: próprio autor

Os valores da pressão registrados pela EMA (Figura 4.5) apresentaram certa consistência, tendo seus valores superiores à média dos valores registrados pelo barômetro da ECP de 1.2hPa.

A umidade registrada pela EMA (Figura 4.6) apresentou diferença média de $\pm 7.7\%$ em relação aos dados registrados pela ECP. No horário das 10h UTC (7 horas no horário de Brasília), foi registrado pela EMA, umidade relativa de 100%. Para fins de confirmação de que não foi erro de leitura, foi constatado que houve formação de gotículas de água no abrigo, conforme

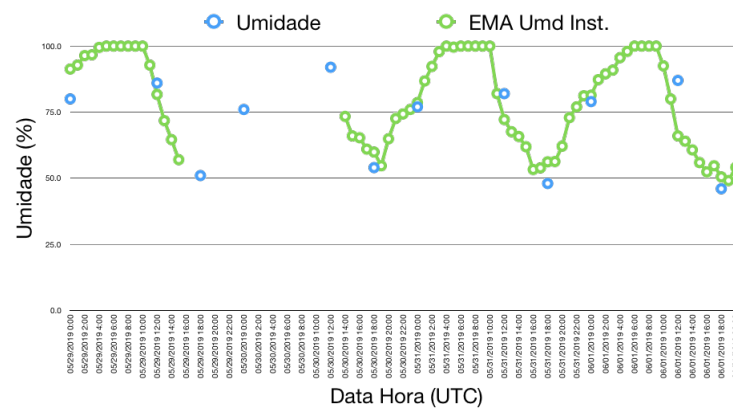
Figura 4.5 – Pressão ECP de Lavras x Pressão EMA



Fonte: próprio autor

Figura 4.7 (a). Com diferença de poucos minutos, foram capturadas imagens do termômetro de bulbo seco, Figura 4.7 (b), e de bulbo úmido, Figura 4.7 (c), da ECP, onde foram registradas as mesmas temperaturas o que corresponde ao ar saturado. Em termos termodinâmicos, a redução de temperatura reduz a capacidade do ar de reter água, passando a deixar as moléculas de água "disponíveis" para a condensação e formação de chuva/sereno/orvalho (DANTAS; CARVALHO; NETO, 1995). Em suma, foi confirmado a veracidade das medidas de umidade.

Figura 4.6 – Umidade ECP de Lavras x Umidade EMA

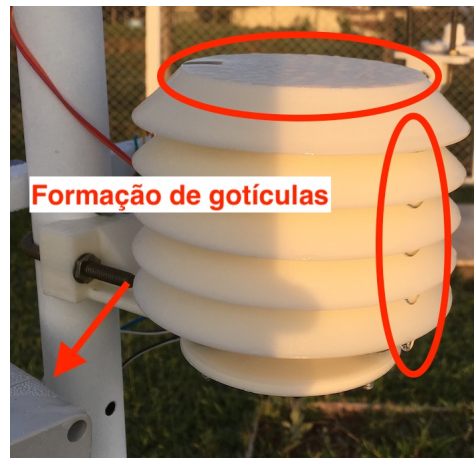


Fonte: próprio autor

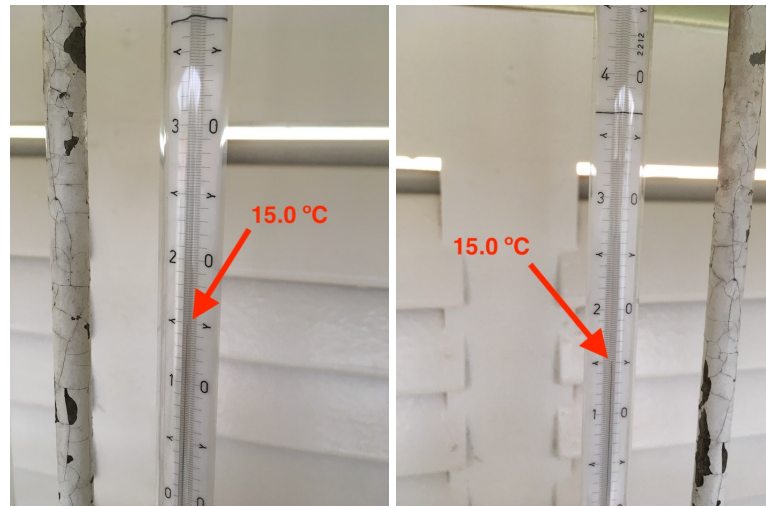
A radiação de ondas curtas mostrou-se ineficiente, tanto as medições saturadas em alguns horários do dia, mais especificamente, no intervalo de 11 as 16 horas, como registrado pela EMA no dia 31 de maio de 2019 (Figura 4.8).

O algoritmo desenvolvido, apresentado na sessão 3.2.1.1 e populado pelos dados descritos na sessão 3.2.2, tiveram os dados do comportamento diário da evapotranspiração da cultura (ET_c) acumulado e os limiares de RAW e RAW com fator de segurança apresentados na Figura

Figura 4.7 – Ar saturado com formação de gotículas no abrigo(a) e a temperatura do bulbo úmido(b) e bulbo seco(c) iguais



(a) Formação de gotículas no abrigo



(b) Termômetro de bulbo úmido (c) Termômetro de bulbo seco

Fonte: próprio autor

4.9. Em termos do critério de irrigação, o sistema acumulou a ET_c até ultrapassar o RAW com fator de segurança. Com base neste critério, para o solo argiloso com plantio de alface, o sistema irrigou 8 vezes no período de 45 dias, enquanto para o solo arenoso, o sistema irrigou 11 vezes durante o mesmo período de tempo. No dia vinte e oito, para o solo arenoso, a ET_c acumulada foi superior ao valor de RAW , fazendo com que a planta entrasse no estado de estresse hídrico por já não ter mais água prontamente disponível no solo para reter. Para as condições propostas o fator de segurança de 20% não foi suficiente para evitar o estresse, pois, no dia anterior o ET_c acumulada representou 72% do RAW e em seguida a ET_c acumulada foi 101.7%, ou seja, um aumento de 29.7%, o que significa 27.1% acima do RAW com fator de segurança. Como não é possível afirmar qual será o acúmulo da ET_c no período de cultivo, reduzir a possibilidade

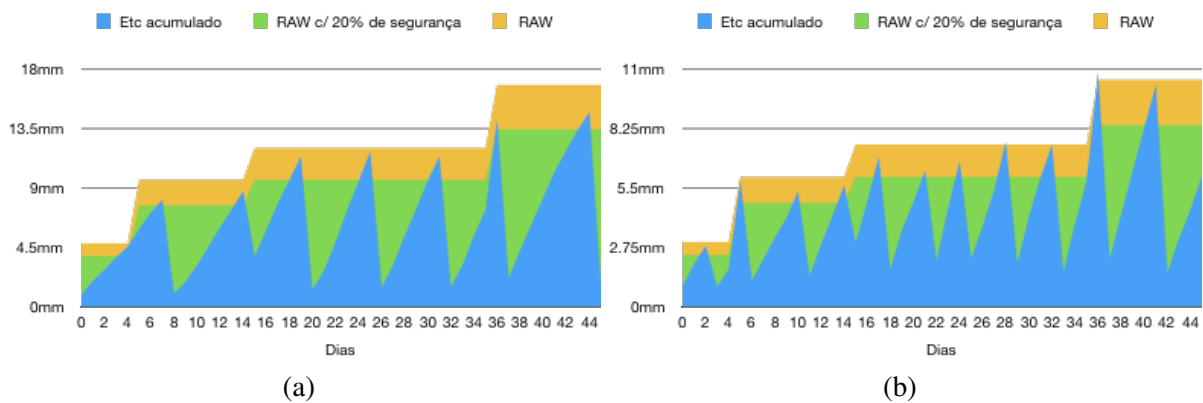
Figura 4.8 – Registros da EMA para o dia 31 de maio de 2019

Data	Hora UTC	Rn Kj/m2	
00:00:09	31/05/2019	00	57.11
01:00:04	31/05/2019	01	57.11
02:00:12	31/05/2019	02	57.11
03:00:06	31/05/2019	03	57.11
04:00:00	31/05/2019	04	45.96
05:00:08	31/05/2019	05	57.11
06:00:02	31/05/2019	06	57.11
07:00:10	31/05/2019	07	57.11
08:00:04	31/05/2019	08	57.11
09:00:12	31/05/2019	09	57.11
10:00:07	31/05/2019	10	1763.17
11:00:04	31/05/2019	11	11397.38
12:00:14	31/05/2019	12	11397.38
13:00:09	31/05/2019	13	11397.38
14:00:05	31/05/2019	14	11397.38
15:00:00	31/05/2019	15	11397.38
16:00:08	31/05/2019	16	11397.38
17:00:04	31/05/2019	17	10170.80
18:00:00	31/05/2019	18	9524.06
19:00:11	31/05/2019	19	11397.38
19:39:01	31/05/2019	19	0.00
20:00:12	31/05/2019	20	3647.64
21:00:09	31/05/2019	21	57.11
22:00:04	31/05/2019	22	57.11
23:00:00	31/05/2019	23	57.11

Fonte: próprio autor

da irrigação ocorrer em estado de estresse da planta, está no aumento do fator de segurança. Consequentemente, reduzindo os turnos da irrigação, pois com o valor do RAW de segurança maior, a disponibilidade de água no solo em faixa segura será reduzida, fazendo com que a ET_c acumulada o atinja com maior frequência.

Figura 4.9 – Turno de rega da alfaca para o terreno argiloso(a) e arenoso(b)



Fonte: próprio autor

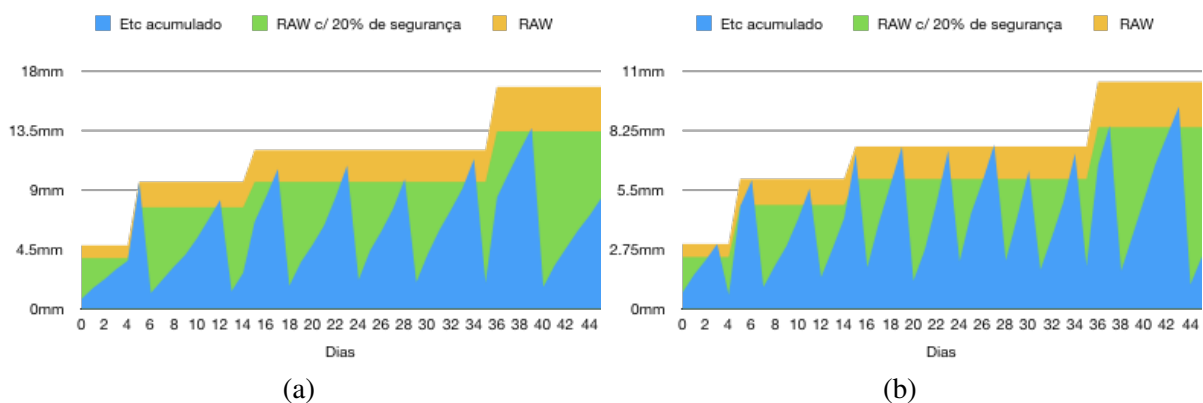
No dia cinco, o sistema encerrou a fase inicial da cultura e deu-se início a fase de desenvolvimento, o que alterou os valores do K_c e Z_r , alterando os valores do TAW e RAW . Neste

momento, o sistema considerou um novo volume de sono no qual a raiz da planta passou a reter água, e que ainda não havia sido irrigada. Neste caso, o sistema acumulou a ET_c no dia mais a diferença do RAW atual pelo RAW anterior, deixando assim todo o volume de solo explorado pelas raízes da planta umedecido.

O sistema no solo argiloso obteve média de irrigação a cada 5 dias e não apresentou nenhuma irrigação em momento que a cultura encontrava-se em estresse. Para o solo arenoso, a frequência média da irrigação foi de 4 dias e percentual de 18.18% (2 casos em 11) da irrigação em momento de estresse, com media da lâmina d'água ultrapassada do RAW de 2.3%.

No caso da rúcula no solo argiloso, a cultura foi irrigada 7 vezes, conforme Figura 4.10, nenhuma irrigação ocorreu em momento de estresse, enquanto para o solo arenoso foram 11 vezes irrigadas, das quais 27.27% (3 casos em 11) foram em momento de estresse. Situações semelhantes ao ocorrido anteriormente se repetiram na cultura da rúcula, efetivando que o fator de segurança de 20% não foi o suficiente para evitar o estresse. Os turnos de rega para o solo argiloso e arenoso apresentaram frequência média de irrigação a cada 6 dias e 4 dias, respectivamente.

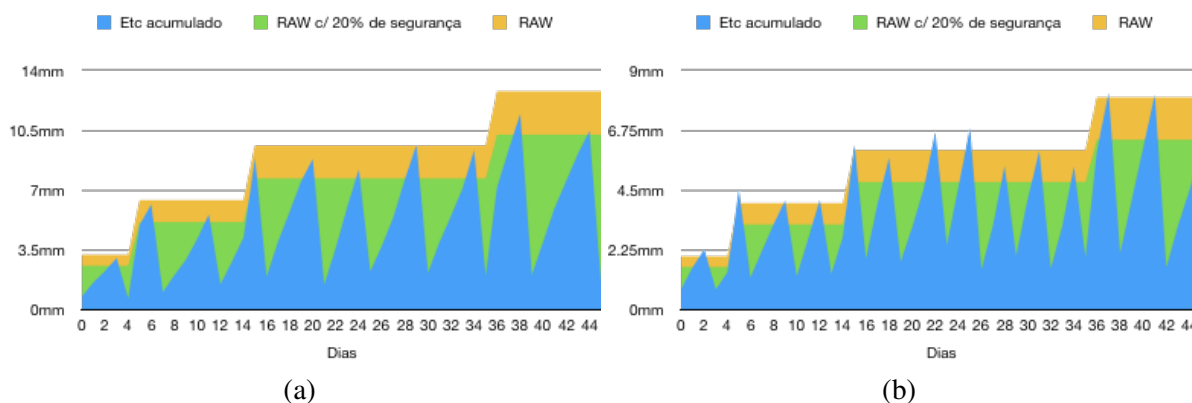
Figura 4.10 – Turno de rega da rúcula para o terreno argiloso(a) e arenoso(b)



Fonte: próprio autor

No caso do solo argiloso para a cultura da espinafre, a irrigação foi ativada 10 vezes, conforme Figura 4.11, com 10%(1 casos em 10) em momento de estresse e para o solo arenoso 13 vezes com 69.2%(9 casos em 13) em momento de estresse. Ambos os solos (arenoso e argiloso) tiveram uma média de irrigação a cada 4 dias. O percentual elevado para o solo arenoso pode ser justificado, levando-se em consideração o baixo valor do RAW , fazendo com que o sistema de irrigação seja ativado com maior frequência por conta do solo suportar pouca água.

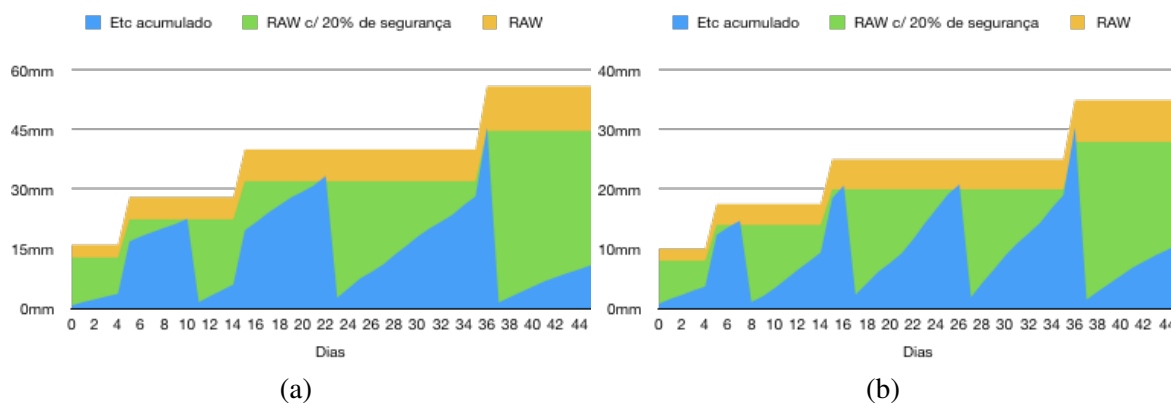
Figura 4.11 – Turno de rega da espinafre para o terreno argiloso(a) e arenoso(b)



Fonte: próprio autor

Para o turno de rega da beterraba (Figura 4.12) para o solo argiloso e arenoso, as irrigações mostraram-se eficientes, tendo a cultura irrigada 3 vezes para o primeiro solo e 4 vezes para o segundo, sem entrar na situação de estresse. As características da planta, por ter um maior comprimento das raízes, obtêm maior volume para absorção de água do solo, sendo assim, melhor aproveitamento do sistema desenvolvido.

Figura 4.12 – Turno de rega da beterraba para o terreno argiloso(a) e arenoso(b)

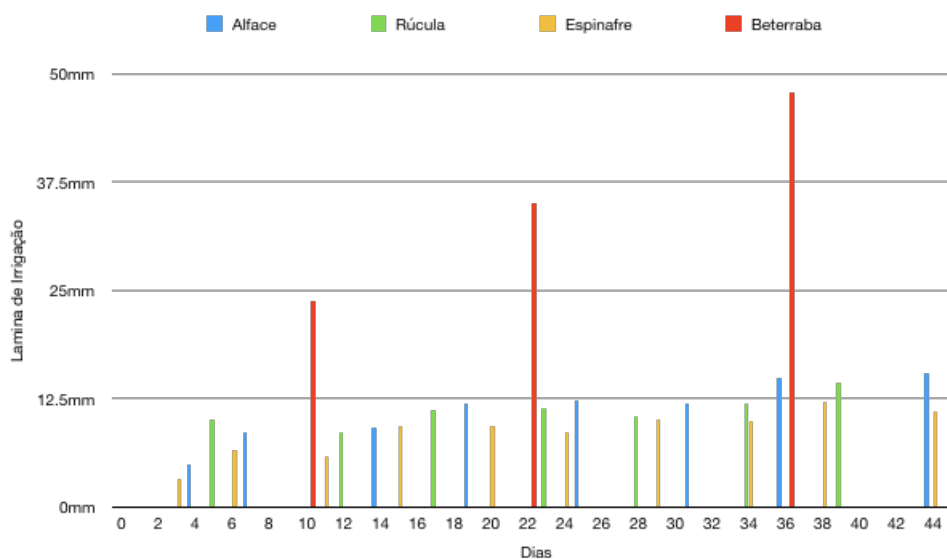


Fonte: próprio autor

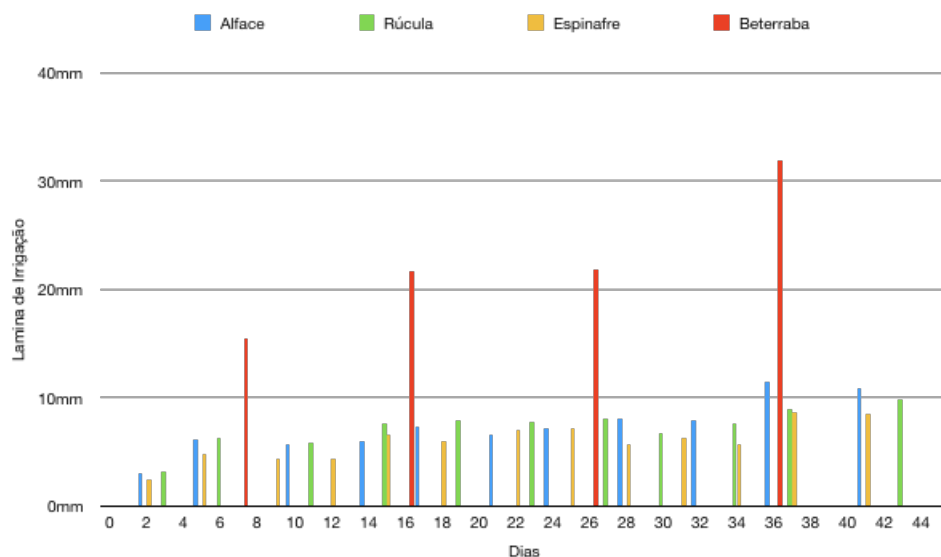
A lâmina d'água das culturas (Figura 4.13), tanto para o solo argiloso, quanto para o arenoso, teve seus valores superiores aos das ET_c 's acumuladas. Este fato se deu por conta da eficiência da aplicação da água por parte dos gotejadores, que foi de 95%, ou seja, o sistema irriga 5% a mais do valor da ET_c acumulada, pois é possível que haja pequenas variações na vazão dos gotejadores. Como observado na Figura 4.13, a frequência da irrigação no solo arenoso foi de 39.2% superior ao solo argiloso.

O fornecimento total de água referente ao período de irrigação para o solo argiloso com plantio de alface foi de 89.2 mm, rúcula, 77.9 mm, espinafre, 85.3 mm e beterraba, 106.9 mm.

Figura 4.13 – Lâmina d'água por cultura em função dos dias



(a) Terreno argiloso



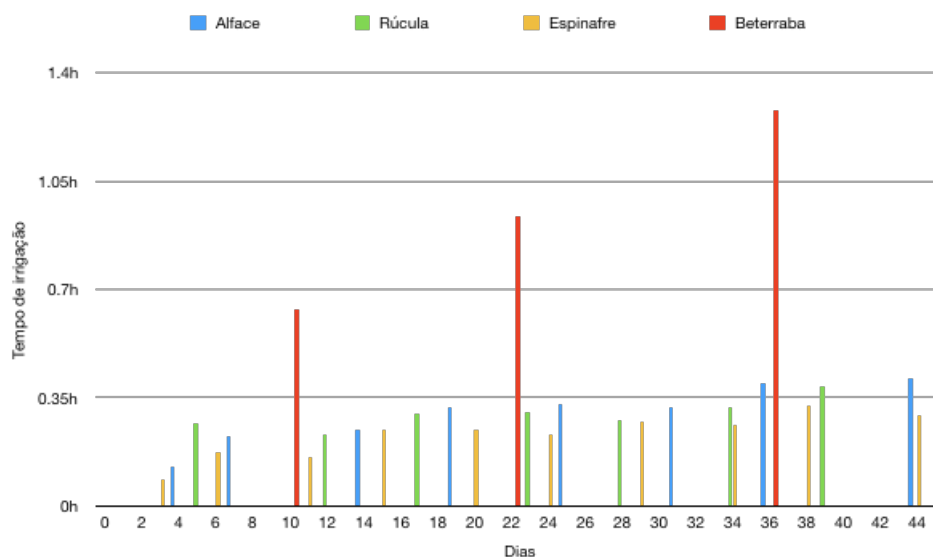
(b) Terreno arenoso

Fonte: próprio autor

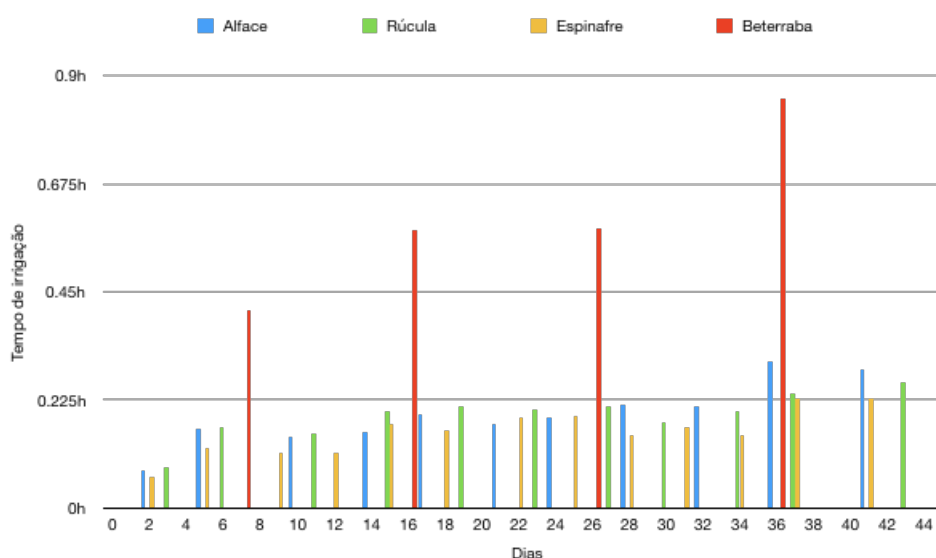
Para o solo arenoso o plantio de alface recebeu 79.8 mm, rúcula, 79.4 mm, espinafre 77.2 mm e beterraba, 91mm.

O tempo de irrigação (Figura 4.14) foi calculado mediante a equação 2.6. Observou-se, para culturas irrigadas com menor frequência, o tempo de irrigação é maior, em razão de um maior acúmulo da ET_c . O tempo de irrigação aumentou com o decorrer dos dias pelo fato de que os valores de K_c da planta tendem a aumentar por conta do crescimento e maior necessidade hídrica.

Figura 4.14 – Tempo de irrigação em horas



(a) Terreno argiloso



(b) Terreno arenoso

Fonte: próprio autor

Valores da capacidade de campo, água prontamente disponível para a planta e o valor de segurança do RAW para que o sistema acione os gotejadores para as quatro culturas dos experimentos testados em dois solos diferentes estão apresentados na Tabela 4.2. A espinafre teve o maior percentual de irrigação em momento de estresse. Isto se deu por causa dos baixos valores de RAW e seus respectivos fatores de segurança, deixando um intervalo (em milímetros) pequeno, mesmo sabendo que este intervalo continue representando 20%. Culturas com intervalos absolutos maiores, como no caso da beterraba, são menos propensas a ter uma ET_c acumulada que aumente em mais de 20% o valor do RAW de um dia para o outro.

Tabela 4.2 – Valores calculados pelo sistema mediante aos dados de entrada fornecidos pela EMA

Argiloso			Arenoso		
Alface					
TAW	RAW	RAW c/ 20%	TAW	RAW	RAW c/ 20%
16	4.8	3.84	10	3	2.4
32	9.6	7.68	20	6	4.8
40	12	9.6	25	7.5	6
56	16.8	13.44	35	10.5	8.4
Rúcula					
TAW	RAW	RAW c/ 20%	TAW	RAW	RAW c/ 20%
16	4.8	3.84	10	3	2.4
32	9.6	7.68	20	6	4.8
40	12	9.6	25	7.5	6
56	16.8	13.44	35	10.5	8.4
Espinafre					
TAW	RAW	RAW c/ 20%	TAW	RAW	RAW c/ 20%
16	3.2	2.56	10	2	1.6
32	6.4	5.12	20	4	3.2
48	9.6	7.68	30	6	4.8
64	12.8	10.24	40	8	6.4
Beterraba					
TAW	RAW	RAW c/ 20%	TAW	RAW	RAW c/ 20%
32	16	12.8	20	10	8
56	28	22.4	35	17.5	14
80	40	32	50	25	20
112	56	44.8	70	35	28

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um equipamento de baixo custo visando o manejo automatizado de um sistema de irrigação localizado por gotejamento em ambiente protegido. A partir dos resultados obtidos, conclui-se que:

- O turno de rega mostrou-se adaptado às necessidades das culturas, suprimindo toda a demanda hídrica necessária para o crescimento.
- Dentre as culturas testadas, o fator de segurança de 20% mostrou-se apropriado para as culturas da alface, rúcula e beterraba em solo argiloso, e para o solo arenoso, apenas a beterraba. Neste caso, o aumento do fator de segurança para as culturas com maior sensibilidade a água se faz necessário, que é o caso do alface, rúcula e espinafre no solo arenoso. Uma possível solução para não alterar o fator de segurança pode estar em calcular a ET_c com menor frequência, fazendo com que a irrigação, além de ter frequências de dias variáveis, possa ser realizada em horários variados.
- Para a validação dos dados da EMA com maior consistência, um período maior de coleta que inclua diferentes estações do ano se faz necessário para que seja analisado o comportamento nas quatro estações do ano, como em dia chuvoso ou sem incidência de raios solares.
- A construção do piranômetro não mostrou resultados satisfatórios, sendo necessário maiores estudos sobre o assunto.
- A confecção de um pluviômetro para compor a EMA aperfeiçoaria o sistema de irrigação, pois o mesmo não considera os dados de precipitação de chuvas.

O desenvolvimento da estação meteorológica automática dedicada resultou em um equipamento de baixo custo, facilidade de manuseio, observação dos dados e acompanhamento do sistema de irrigação com o uso de um aplicativo mobile.

REFERÊNCIAS

- AGRICULTURA, P. e. A. Ministério da. **PROJEÇÕES DO AGRONEGÓCIO: Brasil 2016/17 a 2026/27: projeções de longo prazo**. eighth. <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio-2017-a-2027-versao-preliminar-25-07-17.pdf/view>: SPA/Mapa, 2017. Brasília, DF. 103 p.
- AGROSTAT. **Estatísticas de comercio exterior do agronegócio brasileiro**. 2017. Disponível em: <<http://sistemasweb.agricultura.gov.br/pages/AGROSTAT.html>>.
- ÁGUAS, A.-A. N. de. Conjuntura dos recursos hídricos no brasil: 2017. http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/conjuntura_completo_caf2236b.pdf, 2017.
- ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. et al. **World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision**. [S.l.], 2012.
- ALLEN, R. G. et al. Fao irrigation and drainage paper no. 56. **Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations**, v. 56, n. 97, p. e156, 1998.
- ASADULLAH, M.; ULLAH, K. Smart home automation system using bluetooth technology. In: IEEE. **Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies (ICIEECT), 2017 International Conference on**. [S.l.], 2017. p. 1–6.
- BERNARDO, S. Impacto ambiental da irrigação no brasil. **Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura**. Viçosa: MMA, SRH, ABEAS, UFV, v. 34, 1997.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. [S.l.]: UFV Viçosa, 2016. v. 8.
- BERNARDO, S. S. Ec manual de irrigação. **Viçosa, MG: Editora. UFV**, 1996.
- BIDORBUY. **CJMCU-1080 HDC1080 High Precision Temperature And Humidity Sensor Module For Arduino**. 2018. Disponível em: <<https://img.banggood.com/images/oaupload/banggood/images/C2/96/a0b72e47-090f-5054-5803-06908a675a60.jpg>>. Acesso em: 16 ago. 2019.
- BLADO, L. et al. Smart automated water sprinkler (saws): Residential irrigation by boundary mapping and variable water pressure control. In: IEEE. **Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS), 2017**. [S.l.], 2017. p. 174–179.
- BRASIL. **Lei No 9433/1997 - Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1o da Lei no 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei no 7.990, de 28 de dezembro de 1989**. - Data da legislação: 08/01/1997 - Publicação DOU, de 09/01/1997. 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm>.
- BRUINSMA, J. et al. The resource outlook to 2050: By how much do land, water and crop yields need to increase by 2050. In: **Expert meeting on how to feed the world in**. [S.l.: s.n.], 2009. v. 2050, p. 24–26.

CAMPOS, S. K.; NAVARRO, Z. A pequena produção rural e as tendências do desenvolvimento agrário brasileiro: ganhar tempo é possível. **Brasília: CGEE**, 2013.

CARVALHO, L. G. d. et al. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, scielo, v. 41, p. 456 – 465, 09 2011. ISSN 1983-4063. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-40632011000300020&nrm=iso>.

CÉSAR, E. S. G. E. J.; MELO, F. de. Utilização da técnica de lisimetria de pesagem na automação de um sistema de irrigação localizada para uso no manejo da irrigação de cultivos em recipientes. 2018.

COELHO, E. et al. Sistemas de irrigação para agricultura familiar. **Embrapa Mandioca e Fruticultura-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, Cruz das Almas, Ba: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2012., 2012.

COMMONS, C. **Reed Switch**. 2015. Disponível em: <<https://cdn.sparkfun.com//assets/parts/1/7/8/4/08642-03-L.jpg>>. Acesso em: 16 ago. 2019.

CONCEIÇÃO, M. Roteiro de cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de penman-monteith-fao. **Embrapa Uva e Vinho. Circular Técnica**, Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho., 2006.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G. d.; NETO, P. C. **O vapor d'água na atmosfera psicrometria**. 1995. Disponível em: <http://deg.ufla.br/site/_adm/upload/file/Agrometeorologia/3%20-%20O%20VAPOR%20DAGUA%20NA%20ATMOSFERA%20-%20PSICROMETRI A.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2019.

DEVELOPPEMENT, Y. **Status of the MEMS Industry 2016 Report by Yole Development**. 2016. Disponível em: <https://www.slideshare.net/Yole_Developpement/status-of-the-mems-industry-2016-report-by-yole-developpement>.

DOORENBOS, J. Guidelines for predicting crop water requirements. **Food and Agriculture organization. Rome, Irrig. Drainage pap.**, v. 24, 1975.

EDUCATIONAL, S. U. N.; ORGANIZATION, C. **WATER and energy**. [S.l.]: Un Water, 204 p, 2014. v. 1. France: Unesco.

EMBRAPA. Visão 2030 : o futuro da agricultura brasileira. **Embrapa**, Brasília, DF:, p. 5, 2018.

FAO, F. et al. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW)-Managing systems at risk**. [S.l.]: Rome and Earthscan London, 2011.

GIBERTONI, J. A. M.; PANDOLFI, M. A. C. A problematização da crise hídrica para os pequenos produtores. v. 3 n. 1 (2015): III SIMTEC., 2015.

GONZÁLEZ-ESQUIVA, J. et al. Development of a visual monitoring system for water balance estimation of horticultural crops using low cost cameras. **Computers and Electronics in Agriculture**, Elsevier, v. 141, p. 15–26, 2017.

GRAH, V. d. F.; BOTREL, T. A.; MATOS, I. de. Solução alternativa para bombeamento de água e automação da irrigação sem o uso de energia elétrica. **Irriga, Botucatu**, p. 309–323, 2012.

- GRAHL, C. A. **Sensor de pressão atmosférica**. 2017. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/wp-content/uploads/2017/07/1-16.jpg>>. Acesso em: 16 ago. 2019.
- HAM, J. **Pyranometer, Solar Radiation Sensor for Weather Station**. 2013. Disponível em: <<https://www.thingiverse.com/thing:196191>>. Acesso em: 16 ago. 2019.
- HAM, J. **Radiation Shield For Weather Station Temperature/Humidity**. 2015. Disponível em: <<https://www.thingiverse.com/micromet/about>>. Acesso em: 16 ago. 2019.
- HAMOUDA, Y. E.; ELHABIL, B. H. Precision agriculture for greenhouses using a wireless sensor network. In: IEEE. **2017 Palestinian International Conference on Information and Communication Technology (PICICT)**. [S.l.], 2017. p. 78–83.
- IŞIK, M. F. et al. Precision irrigation system (pis) using sensor network technology integrated with ios/android application. **Applied Sciences**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 7, n. 9, p. 891, 2017.
- JÚNIOR, J. C. F. de M.; GERVÁSIO, E. S.; ARMINDO, R. A. Sistema de automação para o manejo da subirrigação em ambiente protegido. **Irriga**, v. 18, n. 2, p. 337, 2018.
- KOPRDA, Š. et al. A low cost irrigation system with raspberry pi–own design and statistical evaluation of efficiency. **Agris on-line Papers in Economics and Informatics**, Faculty of Economics and Management CULS Prague, v. 9, n. 2, p. 79, 2017.
- LINO, D. R.; NETO, B. P. L.; TEIXEIRA, A. d. S. Irrigação automatizada com plataforma de desenvolvimento arduino na horta didática da universidade federal do ceará. 2017.
- MARQUELLI, W. A.; FREITAS, V. M. T. de. Guia prático para uso do irrigas® na produção de hortaliças. **Brasília: Embrapa Hortaliças. Brasília. 32p**, 2010.
- MASSERONI, D. et al. Towards a smart automated surface irrigation management in rice-growing areas in italy. **Journal of Agricultural Engineering**, Pagepress, v. 48, n. 1, p. 42–48, 2017.
- MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. d. A. Agro 4.0-rumo à agricultura digital. In: IN: MAGNONI JÚNIOR, L.; STEVENS, D.; SILVA, WTL DA; VALE, JMF DO; PURINI, SR DE M.; MAGNONI, M. DA GM; SEBASTIÃO, E.; BRANCO JÚNIOR, G.; ADORNO FILHO, EF; FIGUEIREDO, W. DOS S.; SEBASTIÃO, I.(ORG.). **JC NA ESCOLA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E SOCIEDADE: MOBILIZAR O CONHECIMENTO PARA ALIMENTAR O BRASIL**. 2. ED. SÃO PAULO: CENTRO PAULA SOUZA, 2017. **Embrapa Informática Agropecuária-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. [S.l.], 2016.
- MEDEIROS, S. et al. Manejo de irrigação utilizando o modelo de hargreaves & samani. **INSA-Instituto Nacional do Semiárido, Cartilha**, 2013.
- MOHANDAS, P. et al. An automated irrigation system based on a low-cost microcontroller for tomato production in south india. In: **Computational Intelligence in Wireless Sensor Networks**. [S.l.]: Springer, 2017. p. 49–71.
- MONTOYA, A. et al. Automatic aeroponic irrigation system based on arduino's platform. In: IOP PUBLISHING. **Journal of Physics: Conference Series**. [S.l.], 2017. v. 850, n. 1, p. 012003.

NAGARAJAN, G.; MINU, R. Wireless soil monitoring sensor for sprinkler irrigation automation system. **Wireless Personal Communications**, Springer, v. 98, n. 2, p. 1835–1851, 2018.

OLSZEWSKI, F. et al. Automated cycled sprinkler irrigation for spring frost protection of cranberries. **Agricultural water management**, Elsevier, v. 189, p. 19–26, 2017.

PAZ, V. P. d. S.; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. SciELO Brasil, 2000.

PRADO, R.; FORMIGA-JHNSSON, R.; MARQUES, G. Uso e gestão da água: desafios para a sustentabilidade no meio rural. **Embrapa Solos-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, v. 43, n. 2, p. 43-48, maio/ago. 2017., 2017.

PRUITT, W. **Guidelines for predicting crop water requirements**. [S.l.], 1977.

QI, D.; LU, G.; DAI, X. Design of urban greening intelligent monitoring system based on internet of things technology. In: IEEE. **Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), 2017 9th International Conference on**. [S.l.], 2017. v. 1, p. 317–321.

QUAGLIA, L. **Calibração de um lisímetro de pesagem para monitoramento da evaporação do solo sem cobertura vegetal**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2005.

RAJALAKSHMI, P.; MAHALAKSHMI, S. D. Iot based crop-field monitoring and irrigation automation. In: IEEE. **Intelligent Systems and Control (ISCO), 2016 10th International Conference on**. [S.l.], 2016. p. 1–6.

RODRISZ. **Miniature Solar Cell – BPW34 Arduino projects**. 2014. Disponível em: <<https://chioszrobots.files.wordpress.com/2014/02/solar-cell-mini-bpw34-chiosz-robots.jpg?w=593&h=593>>. Acesso em: 16 ago. 2019.

SAVIĆ, T.; RADONJIĆ, M. Proposal of solution for automated irrigation system. In: IEEE. **Telecommunications Forum (TELFOR), 2016 24th**. [S.l.], 2016. p. 1–4.

SEGOVIA, J.; FILHO, R. L. Irrigação de hortaliças no estado do amapá. **Embrapa Amapá-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, Macapá: Embrapa Amapá, 2004., 2004.

SIROHI, K. et al. Automated irrigation and fire alert system based on hargreaves equation using weather forecast and zigbee protocol. In: IEEE. **Communication Control and Intelligent Systems (CCIS), 2016 2nd International Conference on**. [S.l.], 2016. p. 13–17.

SUSMITHA, A. et al. Automated irrigation system using weather prediction for efficient usage of water resources. In: IOP PUBLISHING. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. [S.l.], 2017. v. 225, n. 1, p. 012232.

SZOSTAK, J. **anemometer**. 2017. Disponível em: <<https://www.thingiverse.com/thing:2559929>>. Acesso em: 16 ago. 2019.

TOEWS, M. W. **Surface water cycle**. 2018. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Surface_water_cycle.svg>. Acesso em: 16 ago. 2019.

WATER, U. Water scarcity. **UN Water. org. Accessed**, v. 19, 2017.

WILDE, S. de. the future of technology in agriculture. **The Hague: Stichting Toekomstbeeld der Techniek**, 2016.